

基于ANSYS的等离子机床轮盘底的静力学及振动分析

李天成, 王 艳

上海理工大学机械工程学院, 上海

收稿日期: 2025年3月29日; 录用日期: 2025年4月22日; 发布日期: 2025年4月30日

摘 要

在机床加工过程中, 振动现象不可避免, 尤其是加工区域的振动会直接影响加工精度以及设备稳定性。为了提升机床的加工性能, 开展整机及关键零部件的力学特性研究具有重要的工程意义。本研究以等离子机床轮盘底为研究对象, 通过有限元方法对其进行了系统的力学性能评估。静力学分析结果表明, 该部件的整体结构刚度满足设计要求; 通过模态分析得到了零件的各阶固有频率, 并结合谐响应分析发现, 当外部激励频率达到200 Hz时, 零件左端圆盘区域会出现明显的共振效应。在此基础上, 进一步对结构参数进行了优化设计, 降低了零件整体的体积, 节约了制造成本。

关键词

等离子机床, ANSYS, 静力学分析, 动力学分析, 结构优化

ANSYS-Based Static and Vibration Analysis of Plasma Machine Wheel Base

Tiancheng Li, Yan Wang

School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Mar. 29th, 2025; accepted: Apr. 22nd, 2025; published: Apr. 30th, 2025

Abstract

In the process of machine tool machining, vibration phenomenon is inevitable, especially the vibration of the machining area will directly affect the machining accuracy and equipment stability. In order to improve the machining performance of machine tools, it is of great engineering significance to carry out research on the mechanical properties of the whole machine and key components. In this study, the plasma machine wheel bottom is taken as the research object, and its mechanical

properties are evaluated systematically by the finite element method. The results of the static analysis show that the overall structural rigidity of the part meets the design requirements; through the modal analysis to obtain the parts of each order of the intrinsic frequency, and combined with the harmonic response analysis found that when the external excitation frequency reaches 200Hz, the left end of the part disc region will appear obvious resonance effect. On this basis, the structural parameters are further optimized and designed to reduce the overall volume of the part and save the manufacturing cost.

Keywords

Plasma Machine Tools, ANSYS, Static Analysis, Dynamic Analysis, Structural Optimization

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

1.1. 等离子机床及其应用

等离子体加工机床作为一种加工设备,在加工金属材料方面具有良好的高效性,因此,在制造业,该设备可广泛应用于各种金属材料的加工,包括铁、铝、钛合金等。其核心技术在于采用专门开发的等离子数控系统,该系统集成了断点记忆、断电保护和处理时间估计等智能功能[1]。

在操作便利性方面,该机配备了专门设计的控制键盘,极大地方便了用户进行工件定位。自 20 世纪 50 年代等离子切割技术在美国成功研发以来,这项技术在全球范围内得到了迅速发展。目前,基于等离子技术的切割设备已在相关行业得到广泛应用,并已成为现代制造业中不可或缺的重要加工手段。目前,等离子机床轮盘底的结构设计核心在于刚性、轻量化与动态稳定性的协同优化。国内在基础结构设计上已具备一定能力,但在高精度材料、先进制造工艺及智能化自适应结构方面仍显著落后于国外[2]。

1.2. 研究意义

ANSYS 是由美国 ANSYS 公司开发的综合有限元分析平台,是全球 CAE 领域中发展最快的工程仿真软件之一。该软件具有强大的多物理场耦合分析能力,可以在多个领域进行仿真计算,如结构力学、流体动力学、电磁场、声学等,并与主流 CAD 系统(如 Creo, AutoCAD 等)实现良好的数据交互[3]。

在本研究中,基于 ANSYS 有限元分析平台,对等离子机床的关键部件——轮盘底进行了全面的机械性能评估和优化设计。首先,通过静态分析评估了部件在典型工作条件下的应力分布和变形,并验证其结构强度满足设计要求。其次,采用模态分析获得部件的固有频率特性,并结合谐响应分析研究其在外部激励下的动态响应特性,识别潜在的共振风险区域。在此基础上,利用与 ANSYS 软件集成的优化设计模块,对轮盘底的几何参数进行了质量减轻、动态特性改善的多目标优化设计。通过建立参数化模型最终获得了综合性能更好的改进方案。优化后的结构不仅满足强度要求,还显著提高了部件的动态性能,为等离子机床的整体性能提升提供了可靠的理论基础和技术支持。

2. 等离子机床轮盘底的静力分析

2.1. 等离子机床轮盘底三维模型

本文的等离子机床模型是利用 Solidwork 完成的,等离子机床的整机模型以及等离子机床轮盘底的

模型如图 1 所示。在利用 ANSYS 软件进行分析之前，确定等离子机床轮盘底的材料为结构钢，相关材料属性如表 1 中所示。

Table 1. Structural steel related parameters
表 1. 结构钢相关参数

材料属性	参数
密度 ρ	7850 kg/m ³
弹性模量 E	200 Gpa
泊松比 μ	0.3

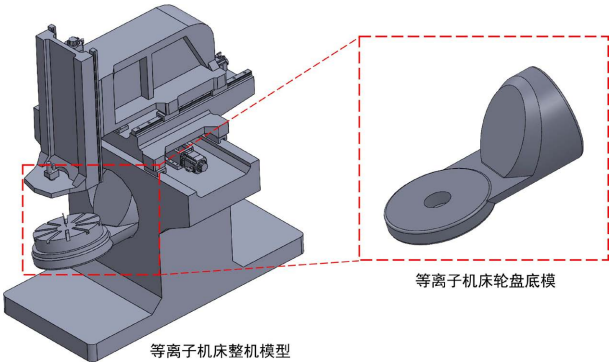


Figure 1. Plasma machine tool modeling
图 1. 等离子机床建模

2.2. 等离子机床轮盘底静力学分析

静力分析主要用于求解结构在外力作用下的位移场、应力场和内力分布，适用于惯性效应和阻尼影响可以忽略不计的工况。ANSYS 软件不仅支持线性静态分析，还可以处理各种非线性问题，包括材料非线性、几何非线性和边界非线性等[4]。

在静力学分析中，首先必须将几何模型导入 ANSYS Workbench 平台。为确保模板数据的完整性，要对导入文件的格式进行兼容性检查。在进行有限元分析之前，网格划分非常重要。ANSYS 具有高效的网格生成工具，可以自动划分复杂的几何体，从而避免了传统网格划分成块造成的网格不匹配[5]。在本研究中，采用整体尺寸控制法对等离子机床圆盘底部进行网格划分，在保证计算精度的同时，为提高整体计算效率，将单元特征长度为 30 mm，所得网格模型如图 2 所示。

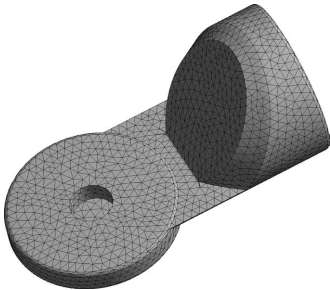


Figure 2. Grid division results
图 2. 网格划分结果

之后根据机床的实际情况, 对零件施加约束和载荷。本次仿真分析在零件的右端的规则圆面上设置了固定约束。并在等离子机床轮盘底靠左端的圆孔上施加了三个大小均为 2000 N 的作用力, 分别与 X 轴, Y 轴, Z 轴正方向平行。

约束和载荷设置完成后, 根据实际情况, 本文对上述工况下进行了总位移的求解, 以及在与 X 轴, Y 轴, Z 轴正方向平行的三个方向上的位移进行了求解, 具体结果如图 3~7 所示, 图中展示了各种情况下产生最大和最小位移的所在位置及其数值, 其中图 6、图 7 分别为上述工况下在 Z 轴方向上的最小和最大位移所在位置。

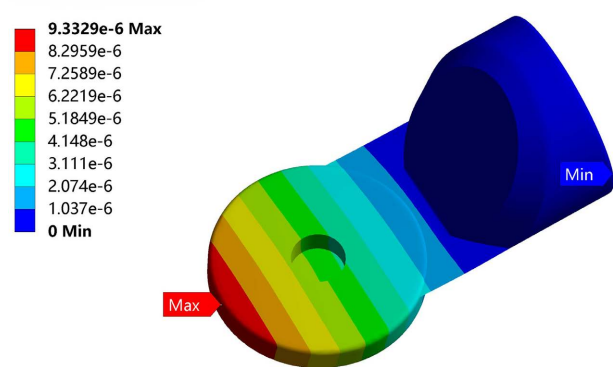


Figure 3. Total displacement
图 3. 总位移

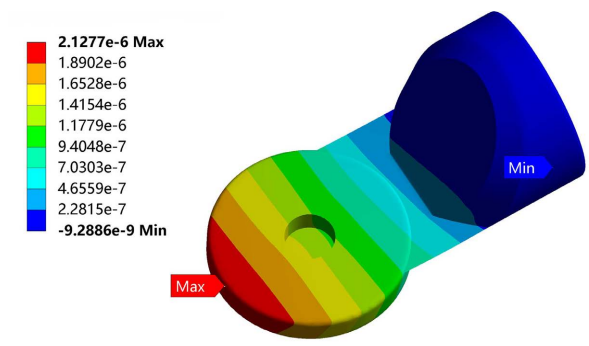


Figure 4. Displacement in X-axis direction
图 4. X 轴方向上位移

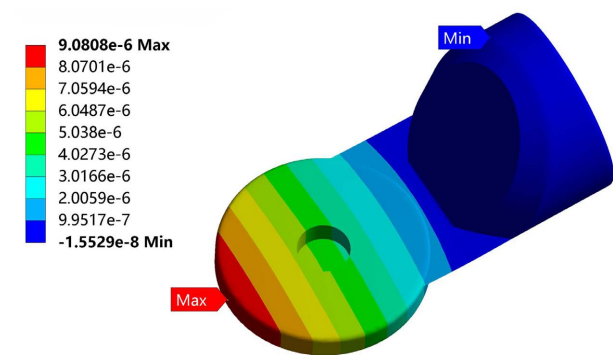


Figure 5. Displacement in the Y-axis direction
图 5. Y 轴方向上位移

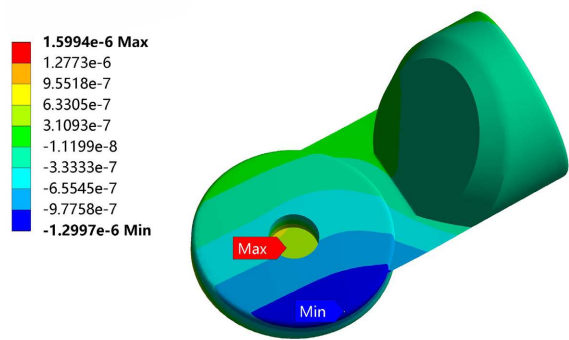


Figure 6. Minimum displacement in the Z-axis direction
图 6. Z 轴方向上最小位移

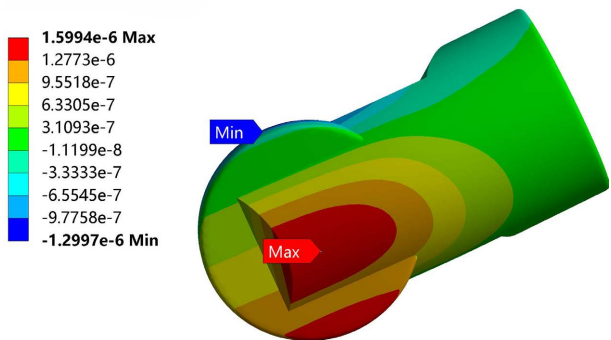


Figure 7. Maximum displacement in Z-axis direction
图 7. Z 轴方向上最大位移

从上述图中可以看出，等离子机床轮盘底的最大位移值为 0.00934 mm，发生在距离零件施加约束的最远端，或者是零件的最左端；X 轴方向上最大位移值为 0.00213 mm，同样发生在距离零件施加约束的最远端；Y 轴方向上最大位移值为 0.00908 mm，依旧发生在距离零件施加约束的最远端；Y 轴方向上最大位移值为 0.00160 mm，发生在零件最下端边界位置。根据以上数据可得：机床在 Y 轴方向上位移最大，但整体而言位移数值较小，所以静力作用下，零件静刚度较好。针对该零件，本文也进行了等效应力的求解。结果如图 8 所示。

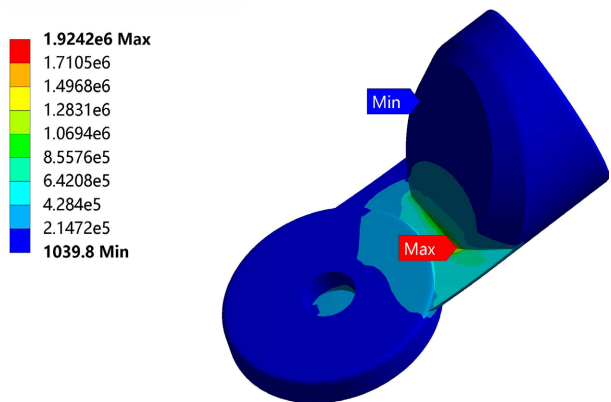


Figure 8. Equivalence result
图 8.等效应力结果

由此分析结果可得, 整机的最大应力为 1.87 Mpa, 发生在等离子机床轮盘底上表面结构尺寸突变的交界处, 结构钢的最大抗拉强度为 235 Mpa, 因此应力远小于强度极限, 结构稳定。

3. 等离子机床轮盘底动力学分析

3.1. 等离子机床轮盘底模态分析

模态分析作为结构动力学研究的重要手段, 在机械系统动态特性评估和故障诊断中具有重要应用价值[6][7]。振动模态反映了弹性结构固有的动力学特征, 是描述系统整体振动行为的关键参数。通过开展模态分析, 研究人员能够获取机械系统在特定频率范围内的各阶模态参数, 包括固有频率、振型等关键信息[8]。这些模态参数为预测结构在外部激励或内部振源作用下的动态响应提供了理论依据[9][10], 对指导机械设备的动态设计和运行维护具有重要意义。

对于某一个特性的系统, 其结构的振动微分方程为:

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

式中, $[M]$ 表示系统的质量矩阵, $[C]$ 表示系统的阻尼矩阵, $[K]$ 表示系统的刚度矩阵; $f(t)$ 为外部激励载荷矩阵; x 表示系统各点的位移, $\dot{x}$ 表示系统各点的位移的一阶导数, $\ddot{x}$ 表示系统各点位移的二阶导数。对于本文而言, 等离子机床轮盘底的振动方程可简化为:

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

本文为了确保分析的连贯性和严谨性, 网格划分以及约束情况同上文保持一致, 以下表 2 为 ANSYS 软件分析出的等离子机床轮盘底的六阶模态对应的固有频率, 图 9~14 分别为零件每一阶模态的特性。

Table 2. Intrinsic frequency of each order of modal analysis
表 2. 各阶模态分析固有频率

Mode	固有频率(Hz)
1	204.78
2	368.14
3	536.12
4	878.03
5	1310.6
6	1372.7

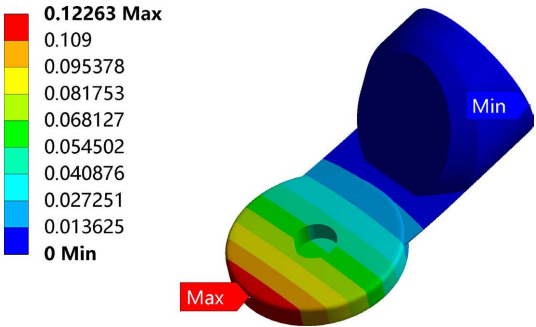


Figure 9. First-order modal properties
图 9. 一阶模态特性

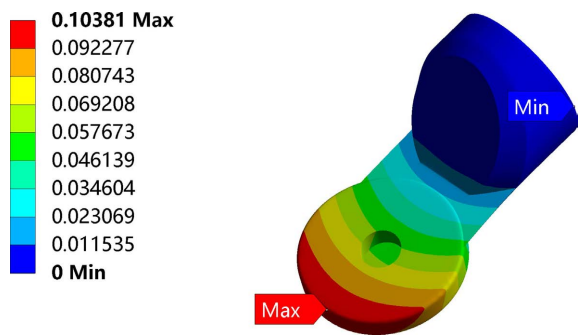


Figure 10. Second-order modal properties
图 10. 二阶模态特性

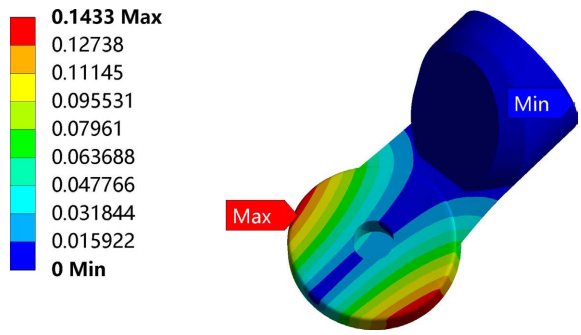


Figure 11. Third-order modal properties
图 11. 三阶模态特性

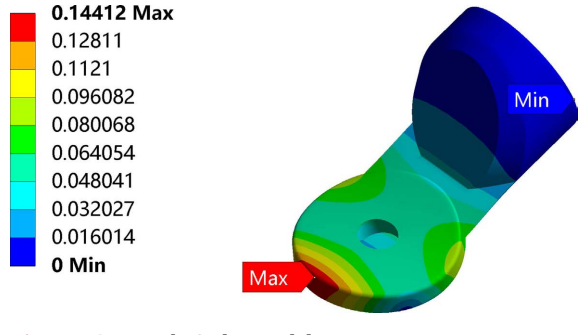


Figure 12. Fourth-Order modal properties
图 12. 四阶模态特性

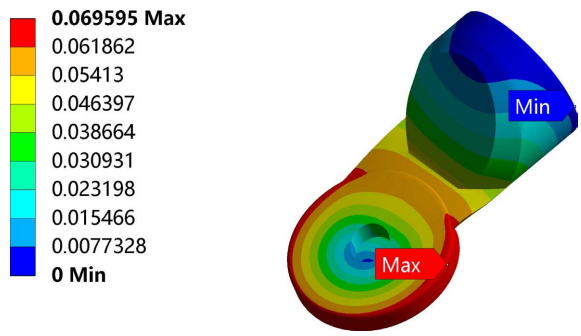


Figure 13. Fifth-order modal properties
图 13. 五阶模态特性

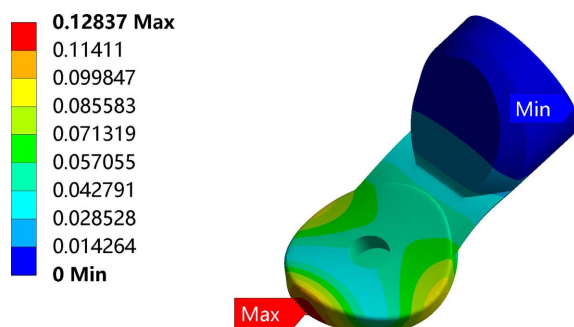


Figure 14. Sixth-order modal properties

图 14. 六阶模态特性

由上图可知, 在此约束条件下, 一阶固有频率为 204.78 Hz, 最大变形位置发生在距离零件施加约束的最远端, 沿 Y 轴摆动; 二阶固有频率为 368.14 Hz, 最大变形位置发生在距离零件施加约束的最远端, 沿 X 轴摆动; 三阶固有频率为 536.12 Hz, 最大变形位置发生在距离零件施加约束的最远端圆盘两侧, 沿 Y 轴摆动; 四阶固有频率为 878.03 Hz, 最大变形位置发生在距离零件施加约束的最远端, 沿 Y 轴摆动; 五阶固有频率为 1310.9 Hz, 最大变形位置发生在零件的中部, 沿 X 轴摆动; 六阶固有频率为 1372.7 Hz, 最大变形位置发生在距离零件施加约束的最远端, 沿 Y 轴摆动;

由上述数据可知, 等离子机床轮盘底的一阶固有频率相对较小, 当外界激励频率处在相对应的频段范围内时, 距离零件施加约束的最远端, 或者是零件的最左端易引起较大的振动位移, 即在外界激励下容易产生共振的现象。因此在此种约束条件下, 等离子机床轮盘底的最左端为动力学性能较差的部分。

3.2. 等离子机床轮盘底谐波响应分析

谐波响应分析用于分析线性结构在随时间呈正弦或余弦变化的简谐载荷的稳态响应, 验证设计结构能否克服共振、疲劳和其他强迫振动的影响[11][12]。谐波响应分析中所有的荷载以及结构的响应在相同的频率下呈正弦变化[13]。

在完成模态分析后, 继续添加谐波响应, 同样为了确保分析的连贯性, 最大模态阶数设置为六阶, 预应力或者模态环境与模态分析保持一致。根据模态分析出的固有频率, 将输入的频率范围设置为 0~2000 Hz, 载荷子步数设置为 40 Hz, 也就是说在该频率段内对应有 40 个谐波响应解。添加约束情况与载荷也与前文保持一致, 即在等离子机床轮盘底靠左端的圆孔上施加了三个方向的作用力, 分别与 X 轴, Y 轴, Z 轴正方向平行, 大小均为 2000 N。在此工况下, 分别对各个方向位移相应和加速度相应求解, 结果如图 15~20 所示。

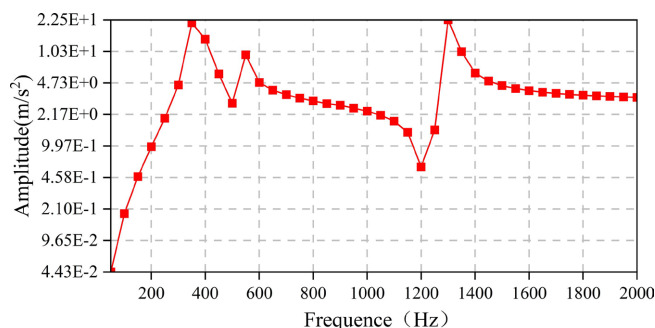


Figure 15. X-axis acceleration response curve

图 15. X 轴方向加速度响应曲线

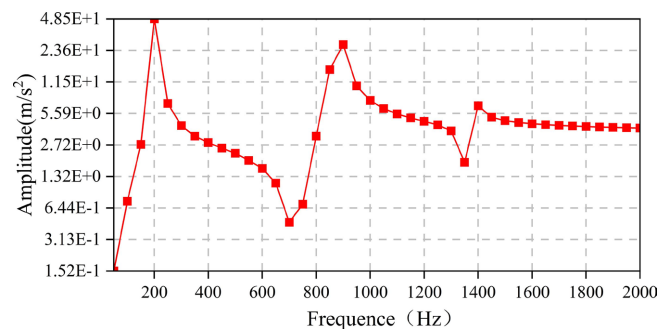


Figure 16. Y-axis acceleration response curve
图 16. Y 轴方向加速度响应曲线

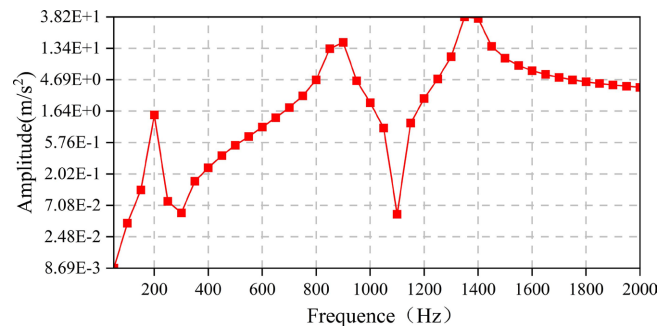


Figure 17. Z-axis acceleration response curve
图 17. Z 轴方向加速度响应曲线

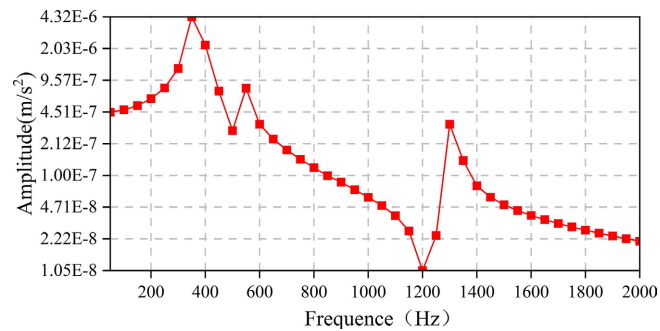


Figure 18. X-axis displacement response curve
图 18. X 轴方向位移响应曲线

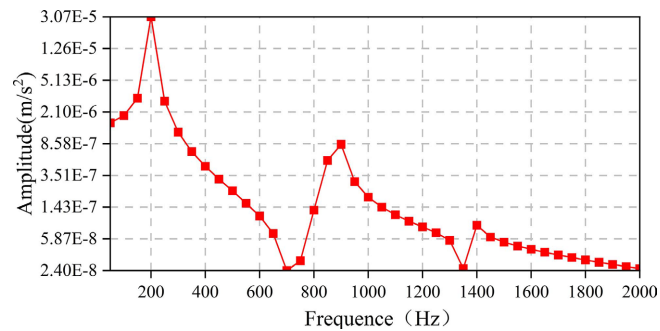


Figure 19. Y-axis displacement response curve
图 19. Y 轴方向位移响应曲线

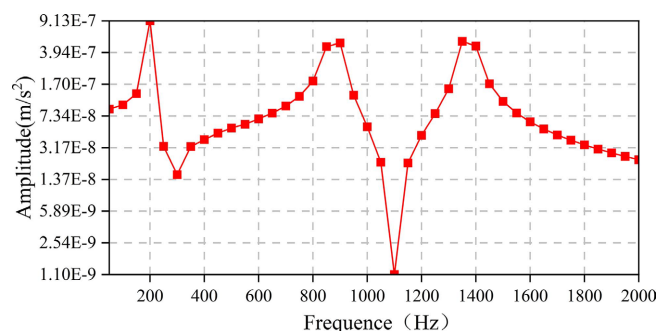


Figure 20. Z-Axis displacement response curve

图 20. Z 轴方向位移响应曲线

由加速度响应曲线可知, 在等离子机床轮盘底靠左端的圆孔上施加 1300 Hz 的激励会使刀具中心在 X 轴上发生共振, 振幅为 22.455 m/S^2 , 相位为 180° ; 施加 200 Hz 激励, 刀具中心在 Y 轴上发生共振, 且出现最大值, 此时在 Y 轴上的振幅为 48.496 m/S^2 , 相位为 180° ; 施加 1350 Hz 的激励, 刀具中心在 Z 轴上发生共振, 此时在 Z 轴上的振幅为 38.187 m/S^2 , 相位为 180° 。

由位移响应曲线可知, 在等离子机床轮盘底靠左端的圆孔上施加 350 Hz 的激励会使刀具中心在 X 轴上发生共振, 振幅为 0.00432 mm , 相位为 0° ; 施加 200 Hz 的激励会使刀具中心在 Y 轴上发生共振, 且出现最大值, 此时在 Y 轴上的振幅为 0.0307 mm , 相位为 0° ; 施加 200 Hz 的激励会使刀具中心在 Z 轴上发生共振, 此时在 Z 轴上的振幅为 0.000913 mm , 相位为 0° 。

综上所述, 等离子机床轮盘底在 200 Hz 左右的外界激励下, 在 Y 轴方向上相对容易产生共振现象, 在其他固有频率处响应相对较小。

4. 等离子机床轮盘底的参数优化

在进行零件的参数优化之前, 需要将建模软件与 ANSYS 软件进行关联操作, 从而实现软件之间的互联, 以便 ANSYS 软件能够识别模型的各项参数[14]。

根据前文的数据以及分析结果来看, 等离子机床轮盘底容易在外界激励下发生共振的位置只要集中在距离零件施加约束的最远端, 因此对此处的模型参数需要进行优化, 首先在 ANSYS 中确定需要优化的参数, 即软件最终优化处理的输入参数。本文选择两个参数, 分别为等离子机床轮盘底最左端圆盘的厚度, 优化处理前的数值为 75 mm , 以及前文中提到的施加载荷的圆孔的直径, 优化处理前的数值为 150 mm 。

确定好输出参数之后, 本文最终选取两个参数为输出参数。参数之一为等离子机床轮盘底在静力分析中的总体最大位移。考虑机械实际工作情况, 选取第二个参数为零件的整体体积, 其中最大位移初始值为 0.00429 mm , 零件整体体积初始值为 0.11404 m^3 。

在此基础之上便可以开始参数的优化处理, 将模型的参数设置为输入参数, 命名为 P1 和 P2, 初始数值分别为 $P1 = 150 \text{ mm}$, $P2 = 75 \text{ mm}$; 同时将零件的总体最大位移和体积设置为输出参数, 分别命名为 P3 和 P4, 初始数值分别为 $P3 = 0.00429 \text{ mm}$, $P4 = 0.11404 \text{ m}^3$ 。

进入到参数求解环节, 在前文的静力分析的基础上, 并考虑实际工程问题, 将参数的求解类型设置为求解最小值, 并设定上限, 将参数 P3 的上限设置为 0.00933 mm ; 将参数 P4 的上限设置为 0.11404 m^3 。其中参数 P1 和 P2 的求解范围为软件默认的范围, 分别为 $135 \text{ mm} \sim 165 \text{ mm}$, $67.5 \text{ mm} \sim 82.5 \text{ mm}$ 。

经过四十余组数据的计算与分析, 最终选取了三个方案, 综合考虑两个输出参数的结果, 本文最终选择方案一为本次优化处理的优化结果, 输入参数圆孔直径由原来的 150 mm 优化为 147.84 mm ; 输入参

数圆盘厚度由原来的 75 mm 优化为 81.066 mm，结果如表 3 所示。在该方案对应的参数下，等离子机床轮盘底零件静力分析的总体最大位移没有明显降低，但零件的总体体积降低为 0.11398 m³。

Table 3. Optimization results for each scenario
表 3. 各方案优化结果

	初始参数值	优化后参数		
		方案一	方案二	方案三
圆盘厚度(mm)	75	81.066	80.129	75.504
圆孔直径(mm)	150	147.87	155.29	155.08
最大位移(mm)	0.00429	0.00429	0.00430	0.001430
最大体积(m3)	0.11404	0.11398	0.11385	0.11396

5. 总结

在等离子机床轮盘底最右端平面添加固定约束，同时在距离约束端较远的圆孔上施加集中力载荷的工作下。由前文的静力学分析可知，零件本身的刚度是符合要求的；由模态分析可知，等离子机床轮盘底的一阶固有频率相对较小，零件的最左端易引起较大的振动位移；在此基础上，由谐响应分析可知，在 200 Hz 左右的外界激励下，在 Y 轴方向上相对容易产生共振现象。在此基础上，对零件进行了构优化设计，以零件的总位移和体积作为目标参数，在满足静力学分析和谐响应分析的基础上最终实现了模型体积的降低。

参考文献

[1] 姜爱宁, 岳源远, 韩小勇, 姜洪旗. 等离子机床切割烟尘收集装置组态控制系统设计探讨[J]. 中国设备工程, 2020(6): 77-78.

[2] 冯鑫. 面向硅基光学元件超精密修形的等离子体加工系统设计[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.

[3] 吴海龙, 岑传富, 曹宇, 钟山. ANSYS 软件在连铸过程中的应用[J]. 连铸, 2022(1): 1-8.

[4] 王鑫. 基于 ANSYS 的 90 mn 重型电极挤压机机身有限元分析[J]. 机械设计, 2022, 39(S1): 154-157.

[5] Sundaramahalingam, S., Arockiaraj, S., Alagammal, S. and Vanaja, N. (2019) Finite Element Modelling and Simulation of Composite Magnetic Materials Using ANSYS. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, **8**, 1489-1494.

[6] 余佳奎, 李舜璐, 李想, 张蒙. 基于 ANSYS 的发动机曲轴有限元静力与模态分析[J]. 河南科技, 2020(23): 36-41.

[7] 李飞伟. 基于 ANSYS Workbench 的机械臂模态分析及振动控制[J]. 微型电脑应用, 2022, 38(2): 205-208.

[8] Han, C. (2020) Modal Analysis of Thrust Coupling Based on ANSYS Workbench. *Journal of Physics: Conference Series*, **1650**, Article ID: 032144. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1650/3/032144>

[9] 朱淼, 侯莹莹. 基于 ANSYS Workbench 的制动器模态特性仿真与优化[J]. 机电工程技术, 2022, 51(9): 181-184.

[10] 陈忠山, 乔红兵, 林尚. 基于 ANSYS 的钻架模态分析及拓扑优化[J]. 煤矿机械, 2022, 43(1): 170-172.

[11] 生开明, 王宁, 高庆, 徐红. 基于 ANSYS 的矿用输送机安装支架模态及谐响应分析[J]. 山东工业技术, 2021(5): 51-55.

[12] 付罗均, 彭岚, 吴龙. 谐响应分析在设备减振中的应用[J]. 中国特种设备安全, 2022, 38(6): 20-25.

[13] Tangsopa, W. and Thongsri, J. (2019) Development of an Industrial Ultrasonic Cleaning Tank Based on Harmonic Response Analysis. *Ultrasonics*, **91**, 68-76. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2018.07.013>

[14] 马春德, 徐家庆, 刘焕新, 谢伟斌, 谭观霜. 基于 ANSYS-FLAC~(3D)的深部采场结构参数优化研究[J]. 矿冶工程, 2021, 41(1): 20-23.