

基于ANSYS的微流控芯片装载系统夹具建模与仿真分析

戴顺达

上海理工大学机械工程学院, 上海

收稿日期: 2024年4月26日; 录用日期: 2024年5月20日; 发布日期: 2024年5月28日

摘要

微流控芯片装载系统是一种用于实现微流控芯片实验的设备, 主要用于生物医学、化学分析、环境监测等领域的研究和应用。为评估夹具的结构强度, 以确定应用或实验过程中不会发生破损或变形, 本文通过ANSYS Workbench对其进行静力学分析、模态分析和谐响应分析, 对提升微流控芯片装载系统工作过程中芯片夹具的稳定性和可靠性有重要意义。

关键词

微流控, 有限元分析, ANSYS Workbench

Fixture Modeling and Simulation Analysis of Microfluidic Chip Loading System Based on ANSYS

Shunda Dai

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

Received: Apr. 26th, 2024; accepted: May 20th, 2024; published: May 28th, 2024

Abstract

The microfluidic chip loading system is a device used to realize microfluidic chip experiments, which is mainly used for research and application in the fields of biomedicine, chemical analysis and environmental monitoring. In order to evaluate the structural strength of the fixture to make sure that no breakage or deformation will occur during the application or experiment, this paper

carries out static analysis, modal analysis and harmonic response analysis by ANSYS Workbench. It is of great significance to improve the stability and reliability of the chip fixture during the working process of microfluidic chip loading system.

Keywords

Microfluidics, Finite Element Analysis, ANSYS Workbench

Copyright © 2024 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

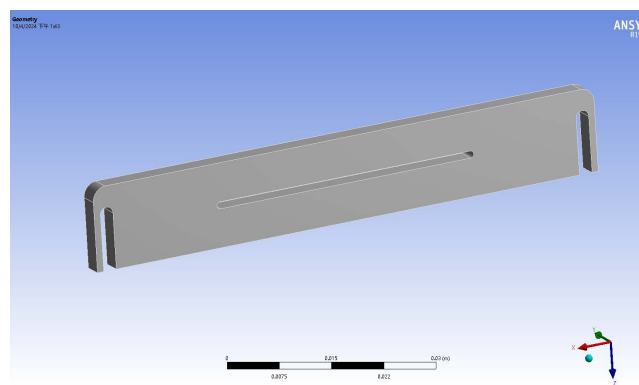
微流控芯片是目前微分析系统发展的尖端领域[1], 在微流控芯片中通过控制注射钠流改变微流控芯片的效果和作用, 在生物、化学、医学等领域有着极大参与度和广泛的应用前景[2] [3]。毛丽凤[4]等利用 SolidWorks 对工装夹具系统进行仿真分析, 优化零件结构; 刘思远[5]等对夹具的冲击进行有限元仿真, 为半正弦跌落仿真提供技术参考; 鞠明洋[6]利用 ANSYS 对振动工装夹具进行设计和仿真, 验证了工装夹具的可靠性; 黄静[7]等在固有频率和振动下对夹具仿真, 选出了合适的振动工装。本文针对微流控装载系统夹具强度评估, 利用 ANSYS Workbench 强大的动力学分析能力, 对微流控芯片装载系统进行静力学分析、模态分析和谐响应分析。首先使用三维制图软件建立模型并将三维模型导入到我们的分析软件中, 设置好对应的材料后进行网格划分, 在静力学分析后, 求解出装载系统夹具的每一阶的固有频率与振型, 然后分析微流控芯片装载系统夹具在受到正压力的载荷时的稳态响应, 从而得出结论, 在使用微流控芯片装载平台时尽量避免夹具发生共振, 尽可能的远离共振点。

2. 装载系统夹具三维模型建立

如图 1(a)所示为芯片装载系统的参考类型图, 本文通过 SolidWorks 对装载系统夹具三维模型进行建模, 三维模型如图 1(b)所示。



(a) 装载系统示例图



(b) 三维建模

Figure 1. Loading system fixture modeling

图 1. 装载系统夹具建模

3. 基于 Workbench 的有限元模型建立

有限元法是求解复杂工程技术问题的数值计算方法，将连续体离散化以求解各种力学问题[8]。其求解与后处理有许多方法，本结构采用 ANSYS19.2 的静力学分析。文有限元分析主要分为三部分：静力学分析、模态分析和谐响应分析，任务树如图 2 所示。

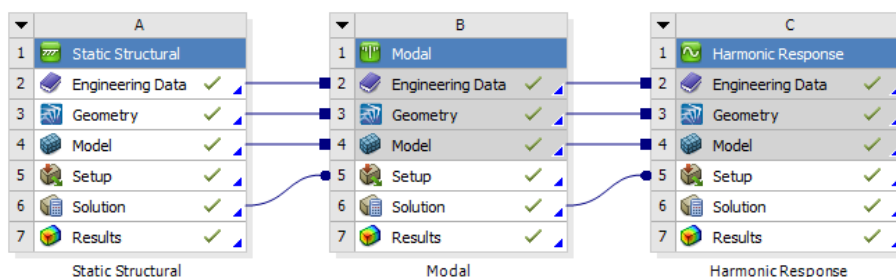


Figure 2. Mission tree
图 2. 任务树

3.1. 定义材料属性

本文的分析类型为弹塑性结构分析，因此该模型采用 6061-T6 铝合金(6061-T6 Aluminum Alloy)，材料密度 2700 kg/m^3 ，杨氏模量为 69 GPa，泊松比为 0.33，参数设置如图 3 所示。

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	2700	kg m^{-3}		
4	Isotropic Elasticity				
5	Derive from	Young's Modulus and Poisson...			
6	Young's Modulus	69000	MPa		
7	Poisson's Ratio	0.3			
8	Bulk Modulus	$5.75\text{E}+10$	Pa		
9	Shear Modulus	$2.6538\text{E}+10$	Pa		

Figure 3. Defining materials
图 3. 定义材料

3.2. 网格划分

将模型导入 Workbench 之后，需要对模型进行单元格划分[9]。Workbench 的网格划分模块具有强大的自动划分功能，本文采用 Multizone 方法对模型进行网格划分，能进行自动几何分解，相对扫掠方法不需要对元件切块，对于一些球、圆柱、简易几何具有很好应用，网格划分结果如图 4 所示。

3.3. 施加约束和边界条件

在进行网格划分后，进行整个 ANSYS 分析中最重要的步骤，设置约束和力。设置力之前，要先设置好约束。由于芯片装载系统仅仅有三个方向的自由度，所以沿轨道方向的两面给与 fix support (固定约束)即可。其中 x 轴运动方向的固定约束如图 5(a)所示，对于芯片装载系统夹具的力，由于装载模式为两夹具固定芯片，故所受力为对称朝向，一方面受到上方的挤压力，另一边受到沿轨道方向来自芯片的反作用力，受力方向如图 5(b)所示。由于微流控芯片比较脆弱，故设定力的大小为 5N。

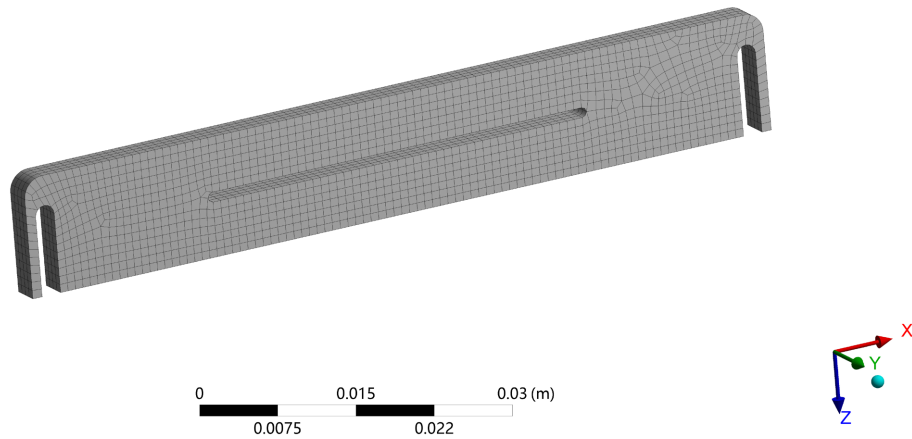
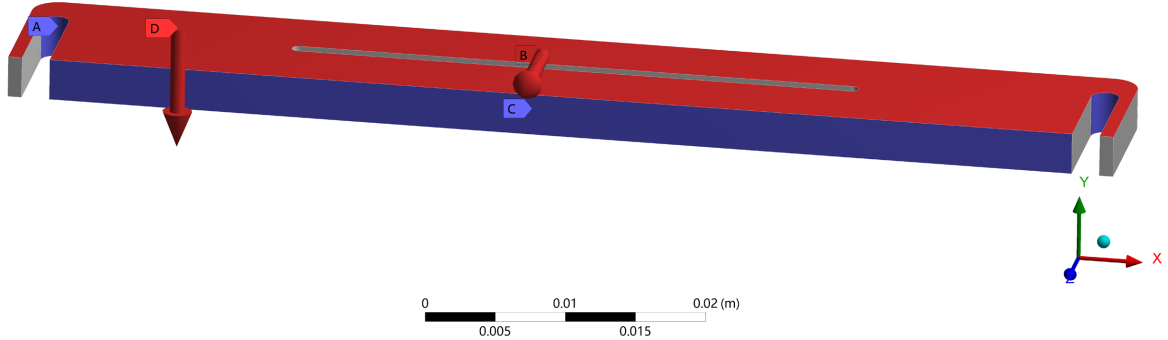


Figure 4. Grid division results
图 4. 网格划分结果

A: Static Structural
Static Structural
Time: 1. s
15/3/2024 下午 2:43

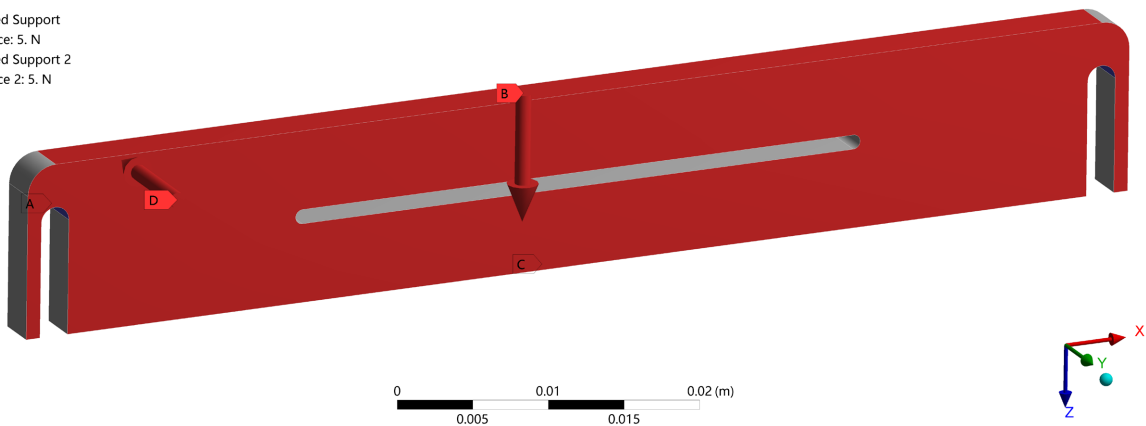
- A Fixed Support
- B Force: 5. N
- C Fixed Support 2
- D Force 2: 5. N



(a) 静力学分析固定约束

A: Static Structural
Static Structural
Time: 1. s
15/3/2024 下午 2:40

- A Fixed Support
- B Force: 5. N
- C Fixed Support 2
- D Force 2: 5. N



(b) 静力学分析力约束

Figure 5. Load and constraint application
图 5. 载荷及约束施加情况

4. 仿真结果及分析

4.1. 静力分析结果及分析

静力学分析(Static analysis)是一种工程和物理学中常用的分析方法,用于研究在静止状态下物体的力学行为和结构反应。静力学分析主要涉及研究物体在受力作用下的平衡状态,即不考虑时间因素和速度变化,仅考虑物体处于静止状态下的力学平衡情况,静力学分析基本方程如下:

$$[K]\{\delta\} = \{P\} \quad (1)$$

式中: $[K]$ ——单位刚度矩阵; $\{\delta\}$ ——位移向量; $\{P\}$ ——静载荷向量。

利用 ANSYS Workbench 对微流控芯片装载系统夹具进行静力学分析[9],如图 6 所示为应力云图,图 7 所示为位移云图。

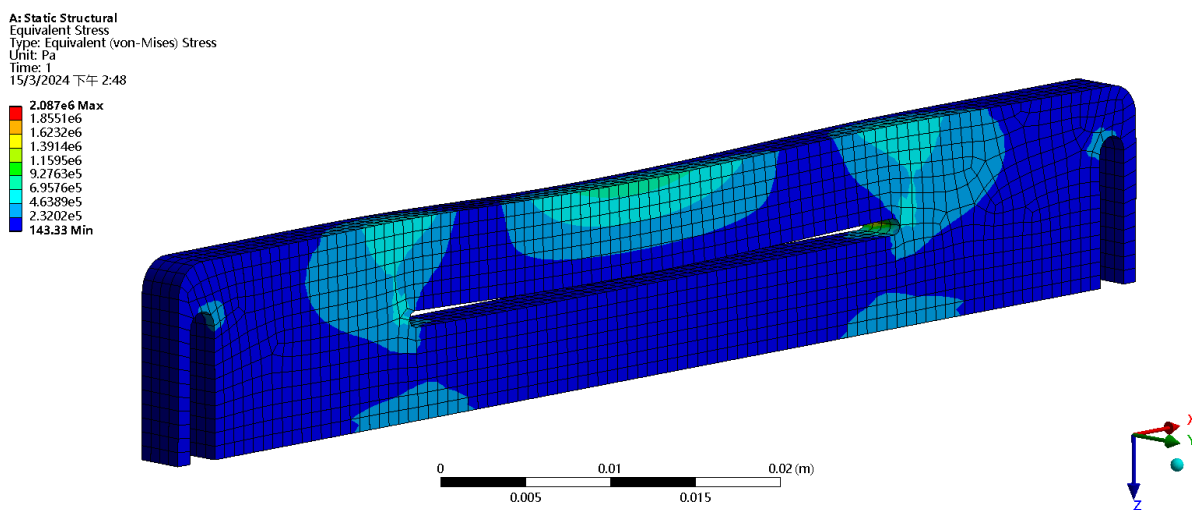


Figure 6. Stress map

图 6. 应力云图

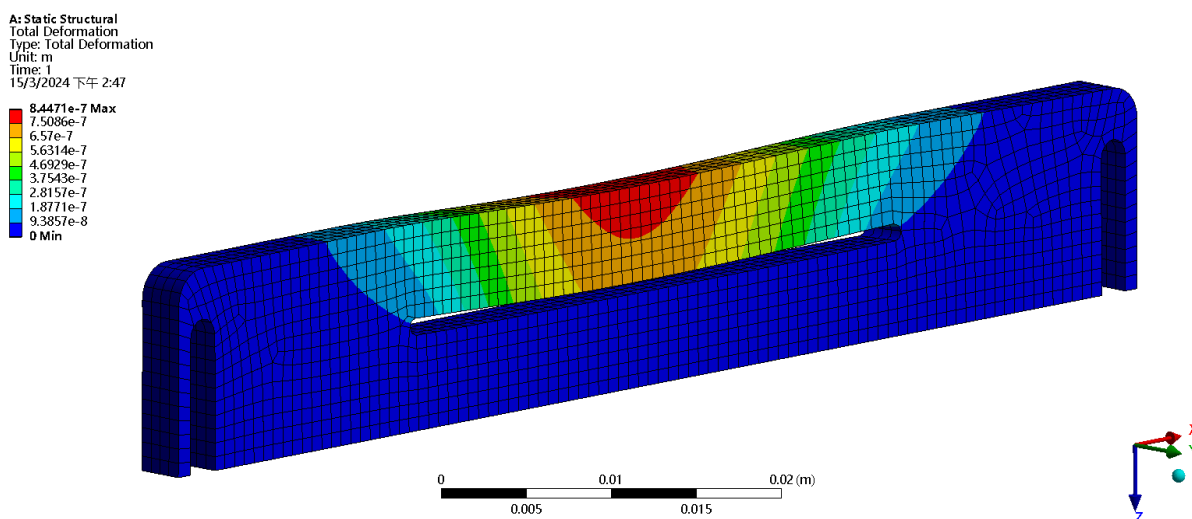


Figure 7. Displacement cloud diagram

图 7. 位移云图

结果显示,最大形变量为 0.084 mm,出现在微流控装载系统夹具上断面中点位置,形变量较小,可以保证微流控芯片装载系统在运行过程中,不会出现夹具破损变形的情况;最大应力为 2.087 MPa,出现在微流控芯片装载系统夹具中空部分两侧。

4.2. 模态结果及分析

模态分析(Modal Analysis)是工程结构动力学中的重要方法,用于研究结构在振动状态下的特性。通过建立数学模型和求解特征值问题,确定结构的固有频率和振动模态[10]。然后,分析振动形态和参数,以预测结构在振动载荷下的响应[11]。模态分析在工程设计和地震工程等领域有广泛应用,可以评估结构的振动特性,设计减振措施,提高结构的稳定性和安全性。本文对微流控装载系统夹具进行模态分析,避免装载系统夹具因受到交变应力和外部激励振动的影响,导致的夹具装载的稳定性下降,严重情况下会导致微流控装载系统夹具变形破损。

利用 ANSYS Workbench 对微流控装载系统夹具求解,提取前 6 阶的固有频率和振型进行分析,如图 8 所示为固有频率结果图,振型图如图 9~14 所示。

结果表明,前六阶固有频率在 0~19,145 Hz 以内,说明该模型的稳定性较好。为评估微流控芯片装载系统夹具在不同频率下的振动响应,确保夹具在工作过程中不会受到外部振动的影响,本文后续对微流控芯片装载系统夹具进行谐响应分析。

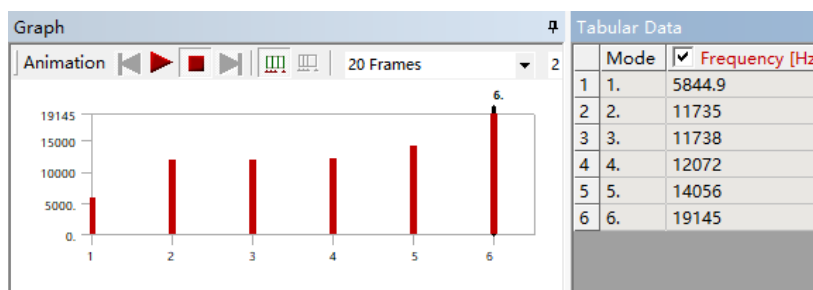


Figure 8. First 6 orders of intrinsic frequency

图 8. 前 6 阶固有频率

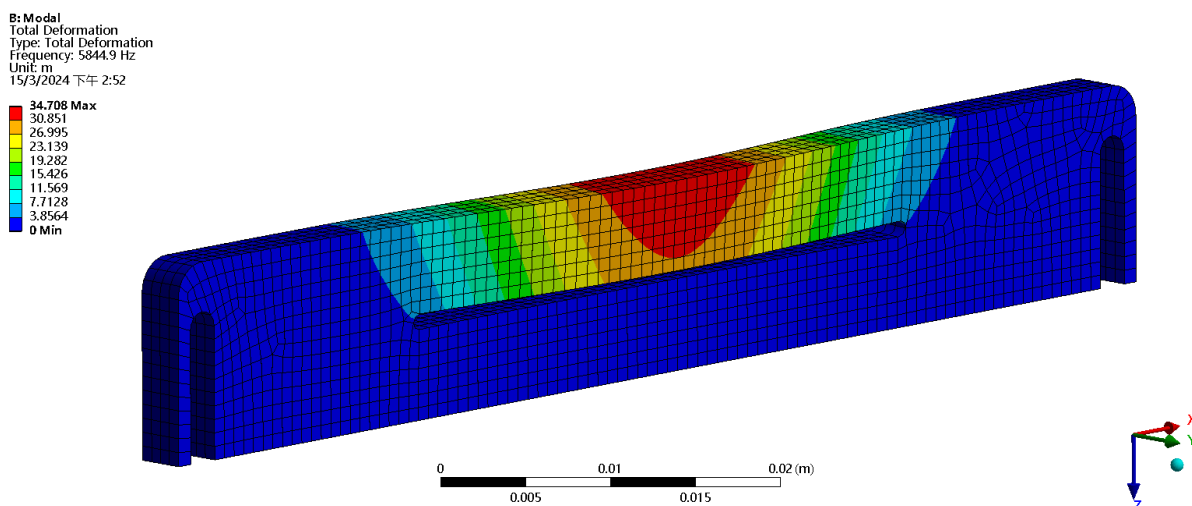


Figure 9. 1st order modes

图 9. 第 1 阶模态

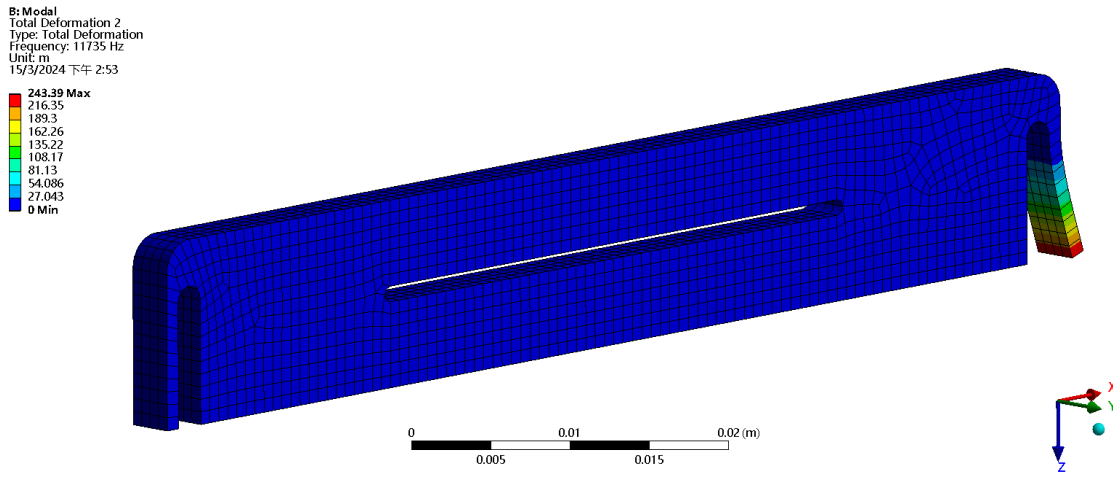


Figure 10. 2nd order modes

图 10. 第 2 阶模态

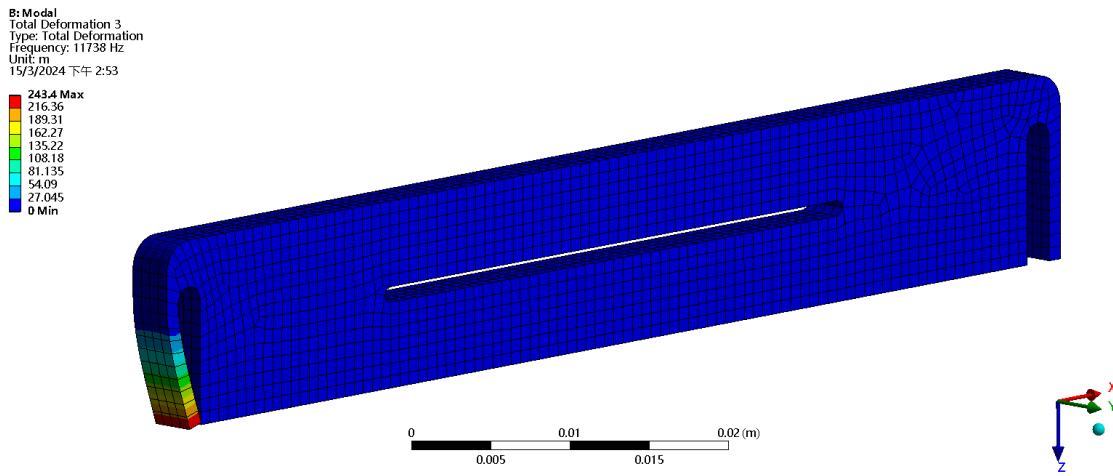


Figure 11. 3rd order modes

图 11. 第 3 阶模态

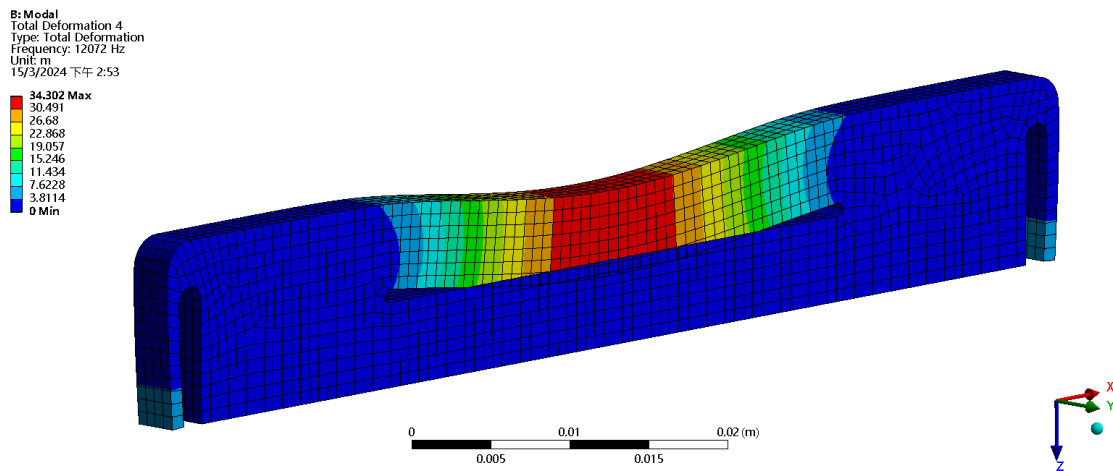


Figure 12. 4th order modes

图 12. 第 4 阶模态

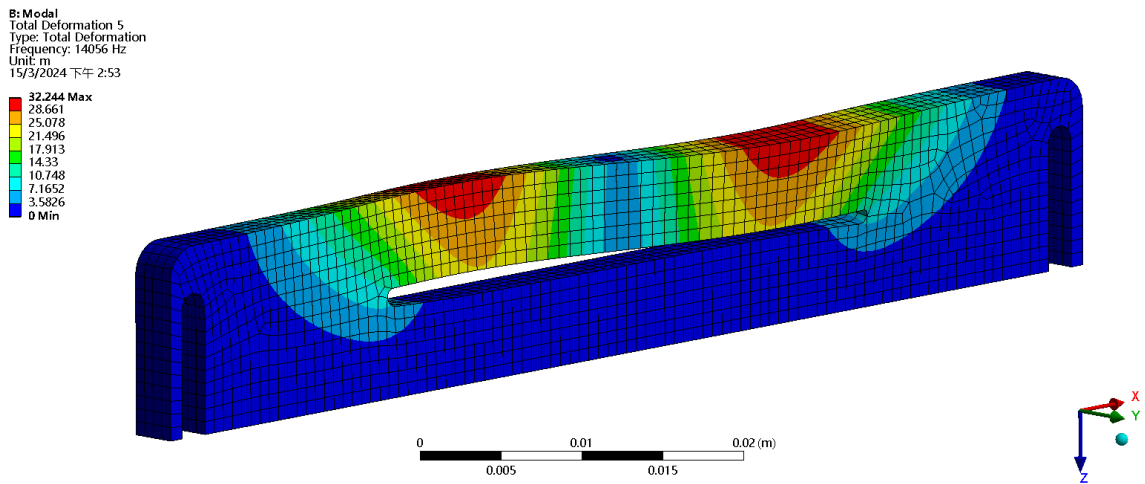


Figure 13. 5th order modes
图 13. 第 5 阶模态

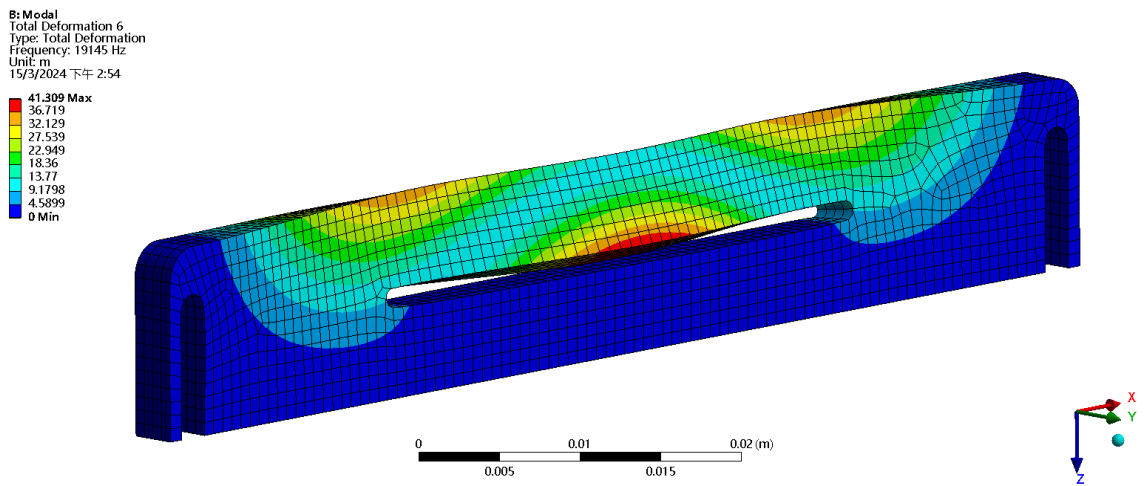


Figure 14. 6th order modes
图 14. 第 6 阶模态

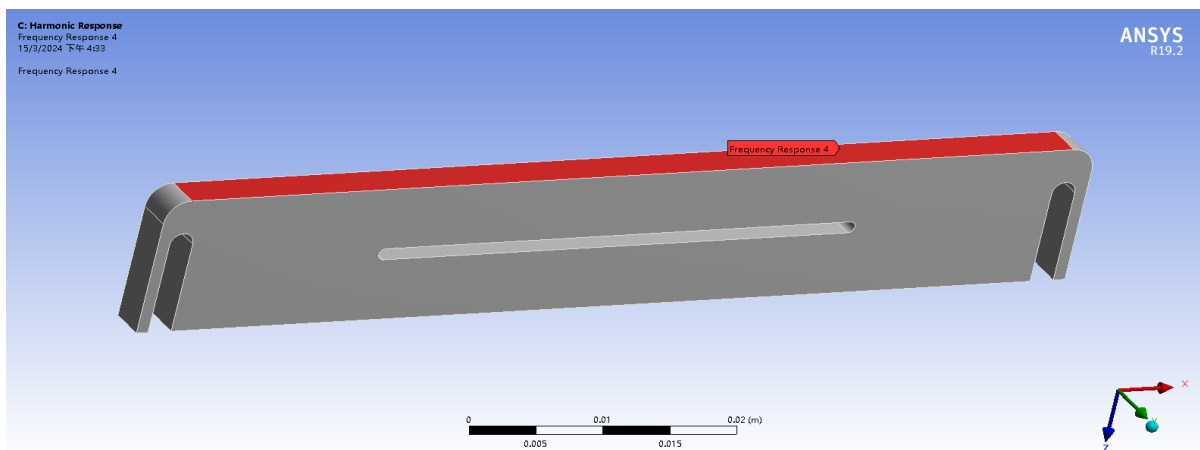


Figure 15. Response surface selection
图 15. 响应面选取

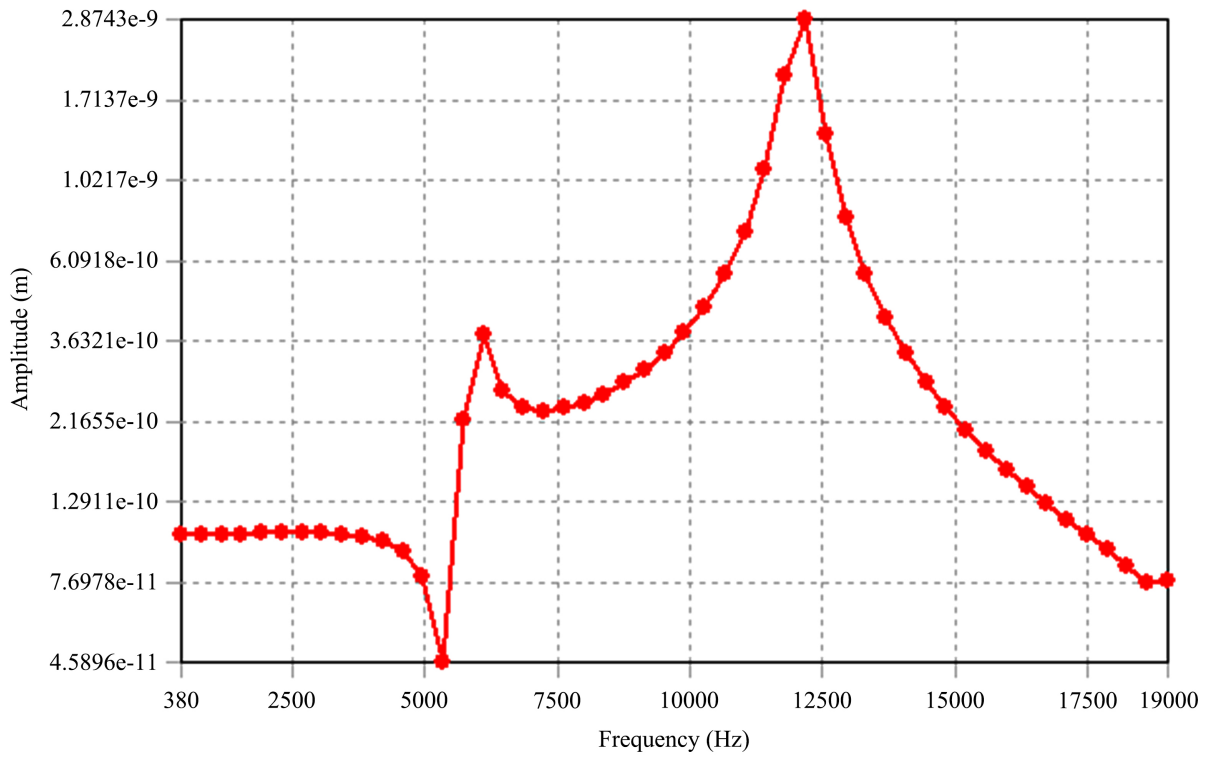


Figure 16. X-direction frequency response curve
图 16. X 方向频率响应曲线

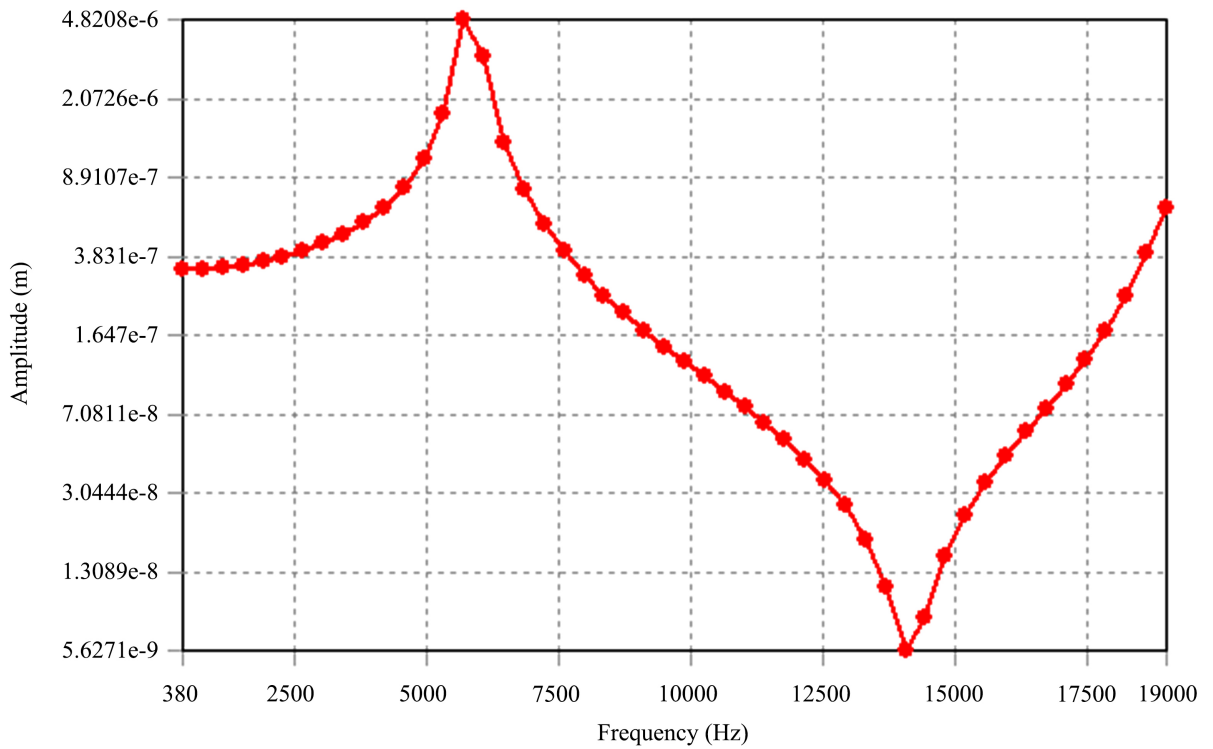


Figure 17. Y-direction frequency response curve
图 17. Y 方向频率响应曲线

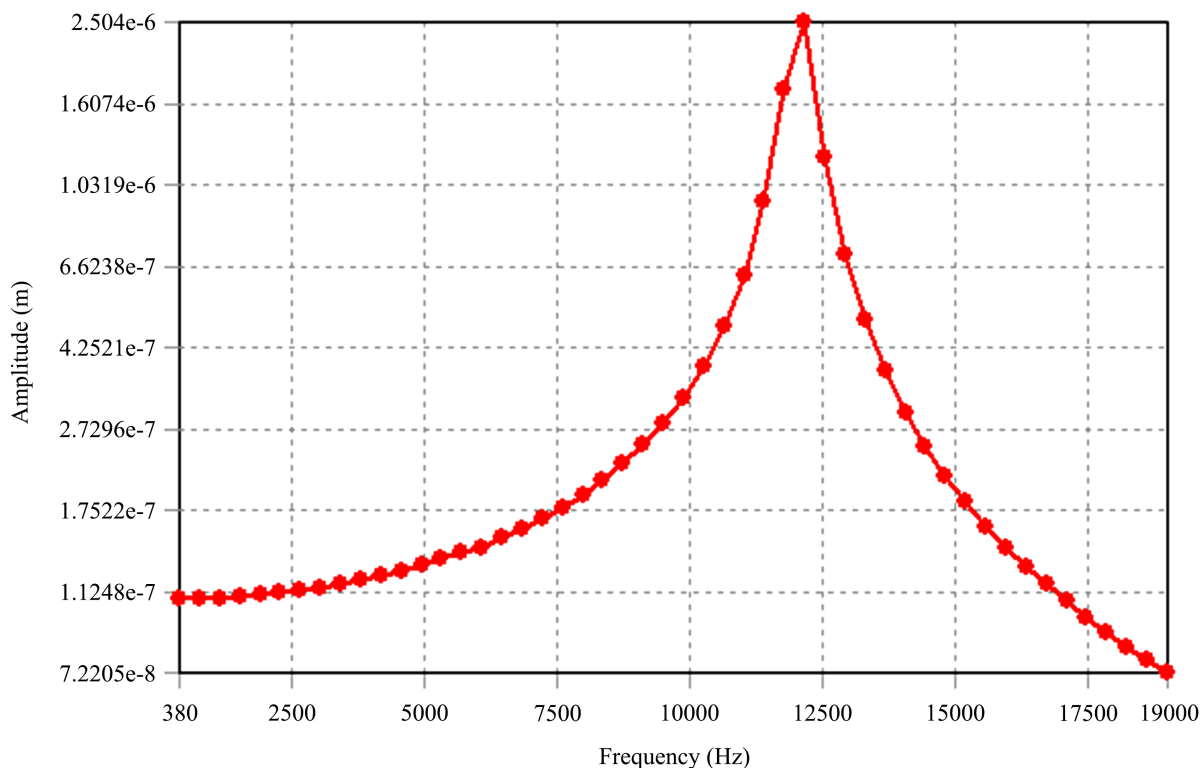


Figure 18. Z-direction frequency response curve

图 18. Z 方向频率响应曲线

4.3. 谐响应结果及分析

谐响应分析(Harmonic Response Analysis)是一种工程分析方法[12], 用于研究结构在受到周期性外力激励时的振动响应。首先, 利用 ANSYS 建立结构的有限元模型, 包括几何形状、材料属性和边界条件。然后, 定义周期性外力载荷的频率和振幅。接着, 通过 ANSYS 求解器计算结构在谐振频率下的响应, 包括位移、应力等。最后, 进行后处理分析, 评估结构的稳定性和安全性。ANSYS 谐响应分析可用于设计优化和预测结构在振动环境下的性能, 广泛应用于航空航天、汽车工程、建筑设计等领域[13]。谐响应选取的面应该有大的变形, 能较为明显的体现出力的变化的关系, 所以本文选取微流控装载系统夹具上端面作为响应面, 如图 15 所示, 具体谐响应分析结果如图 16~18 所示。

根据上述得到的微流控装载系统夹具谐响应分析结果如图 16 所示, 可知在 x 方向 5200 Hz 时, 振幅最小, 在 12,000 Hz 时振幅最大, 因此在工作时应尽量避免外界振动达到 12,000 Hz; 微流控芯片装载系统 y 方向谐响应结果如图 17 所示, 可知微流控芯片装载系统在 5200 Hz, 振幅达到最大, 在 14,000 Hz 时, 振幅最小; 在微流控芯片装载系统 z 方向谐响应结果如图 18 所示, 振幅达到最大时的频率为 12,000 Hz。

5. 结论

本文通过三维建模和仿真, 运用 ANSYS Workbench 软件对微流控芯片装载系统进行建模, 并完成了静力学分析、模态分析和谐响应分析。由结果可知, 微流控芯片装载系统在正常工作载荷情况下, 形变量很小, 不会发生变形破损; 同时谐响应分析结果可知, 在工作情况下要进行避免 5200 Hz 和 12,000 Hz, 避免发生共振, 在 14,000 Hz 时, 共振幅度最小, 最适宜工作。

参考文献

- [1] 王立鼎, 褚金奎, 刘冲, 等. 中国微纳制造研究进展[J]. 机械工程学报, 2008, 44(11): 2-12.
- [2] 王晓东, 罗怡, 刘冲, 等. 塑料(PMMA)微流控芯片微通道热压成形工艺参数的确定[J]. 中国机械工程, 2005(22): 2061-2063.
- [3] 宋满仓, 刘莹, 祝铁丽, 等. 微流控芯片注塑成型缺陷的成因与对策[J]. 机械工程学报, 2011, 47(6): 33-38.
- [4] 毛丽凤, 杨昆, 林君濠. 基于 Solidworks 的工业机器人工装夹具仿真系统研究[J]. 科学技术创新, 2022(34): 40-43.
- [5] 刘思远, 朱升贺, 高堇頔, 等. 基于虚拟激励的平板夹具半正弦冲击仿真技术研究[J]. 环境技术, 2022(S1): 21-26.
- [6] 鞠明洋. 基于 ANSYS 的振动工装夹具的设计和仿真[J]. 环境技术, 2022, 40(5): 218-221.
- [7] 黄静, 郝伟一, 刘亚冬, 等. 基于 ANSYS 的振动工装夹具的设计与仿真分析[J]. 科学技术创新, 2021(29): 71-73.
- [8] 袁安富, 陈俊. ANSYS 在模态分析中的应用[J]. 制造技术与机床, 2007(8): 79-82.
- [9] 董龙梅, 杨涛, 孙显. 基于 ANSYS 对压力容器的应力分析与结构优化[J]. 机械设计与制造, 2008(6): 99-100.
- [10] 邱白晶, 何耀杰, 盛云辉, 等. 喷雾机喷杆有限元模态分析与结构优化[J]. 农业机械学报, 2014, 45(8): 112-116+105.
- [11] 许昕. 基于 ANSYS 的发动机排气歧管结构设计及模态分析[J]. 汽车实用技术, 2024, 49(1): 71-74.
- [12] 刘昌领, 罗晓兰. 基于 ANSYS 的六缸压缩机连杆模态分析及谐响应分析[J]. 机械设计与制造, 2013(3): 26-29.
- [13] 郑彬, 鄂靖元. 发动机连杆有限元模态分析及谐响应分析[J]. 机械设计, 2020, 37(S1): 98-101.