

基于ANSYS的齿轮泵基座有限元分析

王新迪¹, 王 恒², 解子凡¹, 邱 宇³

¹上海理工大学机械工程学院, 上海

²中原食品实验室, 河南 漯河

³常熟理工学院机械工程学院, 江苏 常熟

收稿日期: 2024年12月23日; 录用日期: 2025年1月16日; 发布日期: 2025年1月24日

摘 要

齿轮泵基座是确保齿轮泵稳定运行的关键部件, 其结构性能直接影响泵的整体工作可靠性。为了评估基座的结构强度, 确保其在实际应用过程中不会发生破损或变形, 本文利用ANSYS Workbench对齿轮泵基座进行了静力学分析、模态分析和谐响应分析。通过这些分析, 深入了解了基座在不同工况下的力学特性, 这对于提高齿轮泵基座在运行过程中的稳定性和可靠性具有重要意义, 并为后续的优化设计提供了理论依据和技术支持。

关键词

齿轮泵, 静力学分析, 模态分析

Finite Element Analysis of Gear Pump Base Based on ANSYS

Xindi Wang¹, Heng Wang², Zifan Xie¹, Yu Qiu³

¹School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

²Food Laboratory of Zhongyuan, Luohe Henan

³School of Mechanical Engineering, Changshu Institute of Technology, Changshu Jiangsu

Received: Dec. 23rd, 2024; accepted: Jan. 16th, 2025; published: Jan. 24th, 2025

Abstract

The gear pump base is a key component for ensuring the stable operation of the gear pump, and its structural performance directly affects the overall reliability of the pump. To evaluate the structural strength of the base and ensure that it does not fail or deform during practical application, this study utilizes ANSYS Workbench to conduct static structural analysis, modal analysis, and harmonic

response analysis of the gear pump base. Through these analyses, a comprehensive understanding of the mechanical characteristics of the base under different working conditions is obtained, which is crucial for improving the stability and reliability of the gear pump base during operation and provides a theoretical basis and technical support for further design optimization.

Keywords

Gear Pump, Static Analysis, Modal Analysis

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

齿轮泵基座是确保齿轮泵稳定运行的重要部件，其结构性能直接影响泵的整体工作可靠性。在工业生产中，齿轮泵广泛应用于液压系统、润滑系统等领[1][2]，其运行的稳定性对于整个系统的安全至关重要。由于齿轮泵基座需要承受各种静态和动态载荷，这使得其结构设计和工艺流程面临严峻挑战。因此，有必要对基座的结构性能进行详细分析，以确保其在复杂工况下的可靠性和耐久性。尤其是齿轮泵基座在长期运行过程中可能会受到多种类型的交变载荷和环境因素的影响，容易产生疲劳破坏或其他类型的失效。为了确保齿轮泵基座的安全性和可靠性，进行系统的有限元分析显得尤为重要。

近年来，针对齿轮泵基座的结构分析和优化设计，许多学者开展了广泛的研究。姜鑫基于 ANSYS Workbench 对 CB-B 型齿轮泵基座进行了温度场分析[3]，得出结论温度过高会进一步损耗齿轮泵。宫乙帅，吴学群等人设计了一种自保护齿轮泵[4]，对齿轮泵的壳体、基座进行有限元分析，分析应力应变对齿轮泵的影响。有限元分析作为一种重要的工程工具，在这些研究中得到了广泛应用，不仅能够设计阶段预测结构在各种载荷条件下的响应，还能减少物理实验的成本和时间。

本文的研究重点在于评估齿轮泵基座在复杂载荷条件下的力学性能，并通过仿真分析结果验证其设计的合理性和安全性。通过静力学分析评估基座在静态载荷下的应力和变形分布，识别结构中的薄弱环节；通过模态分析[5]确定基座的固有频率及其振型，以避免可能的共振；最后，通过谐响应分析[6]了解基座在周期性激励下的响应情况，为减少振动影响、提高系统稳定性提供参考。

2. 建立三维模型

本文通过 SolidWorks 对齿轮泵基座三维模型进行建模，三维模型如图 1 所示。

3. 基于 ANSYS Workbench 的静力学分析

本章节利用 ANSYS Workbench 对齿轮泵基座进行静力学分析，评估其在静态载荷下的结构性能。首先，通过几何结构模块建立基座模型，在静态结构模块中定义材料、施加载荷和边界条件，进行求解以获得应力和变形结果。同时，进行模态分析和谐波响应分析，以评估基座在不同工况下的振动特性和响应行为，为结构设计优化提供数据支持。任务图如图 2 所示。

3.1. 材料选取及参数确定

本文中所建立的齿轮泵基座模型采用 QT500-7 球墨铸铁(QT500-7 Ductile Iron)，屈服强度约为 320 MPa，材料密度 7200 kg/m^3 ，弹性模量 170 GPa，泊松比 0.28。具体参数设置如图 3 所示。

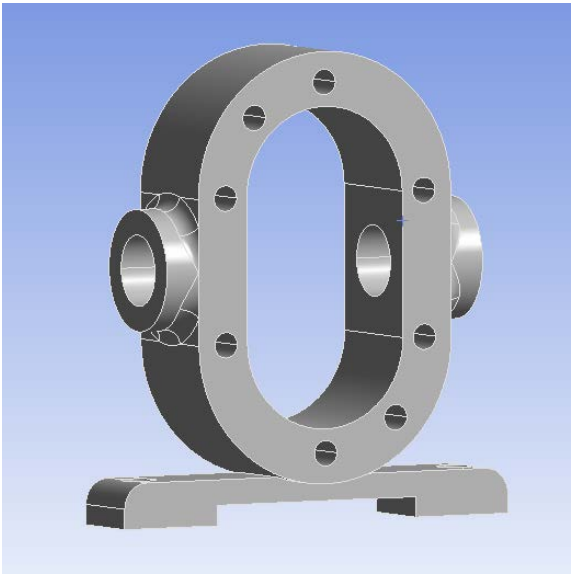


Figure 1. Gear pump base model
图 1. 齿轮泵基座模型



Figure 2. Mission tree
图 2. 任务树

属性	值	单位
材料场变量	表格	
Density	7200	kg m ⁻³
Isotropic Elasticity		
衍生于	杨氏模量与泊松比	
杨氏模量	170	GPa
泊松比	0.28	
体积模量	1.2879E+11	Pa
剪切模量	6.6406E+10	Pa
Bilinear Isotropic Hardening		
屈服强度	320	MPa
切线模量	1E-08	GPa

Figure 3. Material definition
图 3. 材料定义

3.2. 网格划分

在基于 ANSYS Workbench 的齿轮泵基座有限元分析中, 为了确保仿真结果的精度, 选择了 4 mm 的网格尺寸。图 4 所示的网格模型展示了几何体上的均匀网格分布, 有效捕捉了关键细节和潜在的应力集中区域。

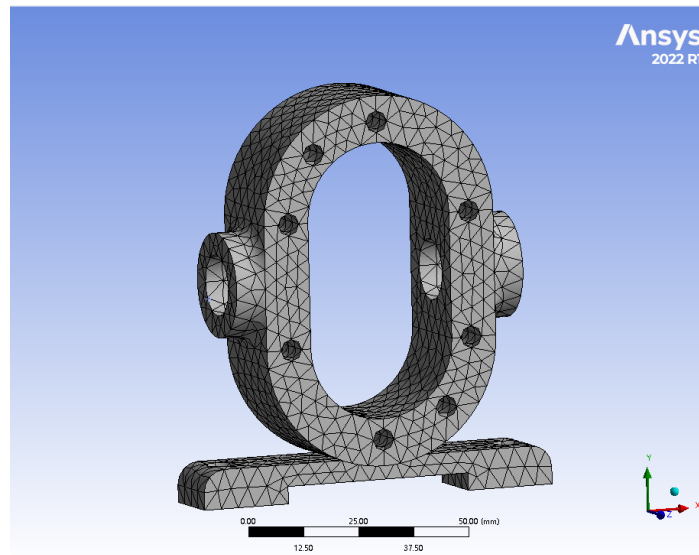


Figure 4. Grid division

图 4. 网格划分

3.3. 施加约束及载荷

在进行齿轮泵基座的静强度分析时，施加载荷和约束是关键步骤，确保分析可以模拟实际工作条件，从而验证整个结构是否在承受设计载荷的情况下能够安全运行。通常齿轮泵基座通过螺栓固定在地面或其他支撑结构上，因此可以选择基座底部与地面接触的平面，如图 5 所示。

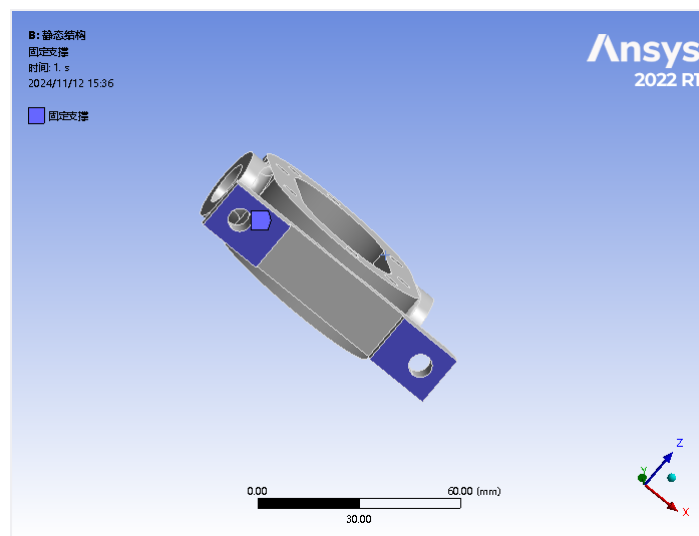


Figure 5. Static analysis fixed constraints

图 5. 静力学分析固定约束

在基座的内表面施加载荷，模拟齿轮对基座产生的反作用力。径向力是齿轮在旋转过程中由于啮合产生的侧向力，方向垂直于轴的方向。可以在基座内表面施加径向的载荷，方向与齿轮轴垂直。轴向力与径向力相同，也选择轴承孔内部表面施加。沿轴线方向施加，模拟齿轮受到的推力，这个力会沿着齿轮轴的方向施加。内测上表面沿 Y 轴方向施加 8000 N 的力，沿 Z 轴方向施加 1600 N 的力，内测下表面

沿 Y 轴反方向施加 10000 N 的力, 沿 Z 轴方向施加 2000 N 的力, 如图 6 所示。

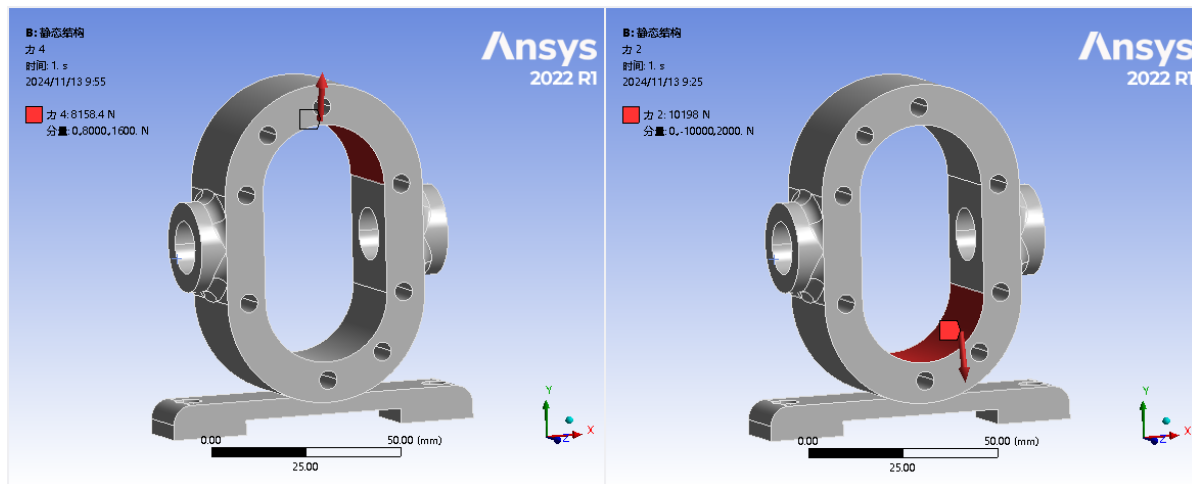


Figure 6. Applied internal surface load

图 6. 施加内表面载荷

液体压力载荷的设置应当考虑齿轮泵的工作压力。通常在进油口和排油口的壁面上施加该载荷, 以模拟液体对基座的压力。设置压力为 5 MPa, 如图 7 所示。

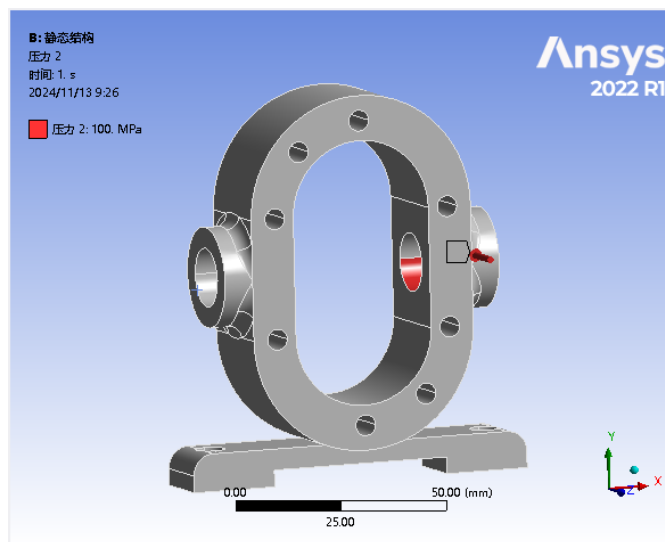


Figure 7. Applied fluid pressure load

图 7. 施加液体压力载荷

3.4. 静力分析结果及分析

根据图 8 所示的齿轮泵基座的等效应力(Von-Mises 应力)分布情况, 最大等效应力为 58.32 MPa, 主要集中在基座内侧圆弧区域。这些高应力区域表明该位置在受力状态下可能是结构的薄弱环节。在齿轮泵运行过程中, 由于承受较大的交变载荷, 这些应力集中区域可能会引发疲劳或局部失效, 对整体结构的可靠性产生不利影响。然而, 最大等效应力仅为 58.315 MPa, 远小于 QT500-7 材料的屈服强度(320 MPa), 仅占屈服强度的约 18%。这表明在静态载荷情况下, 基座在材料强度方面具有较大的安全裕度。

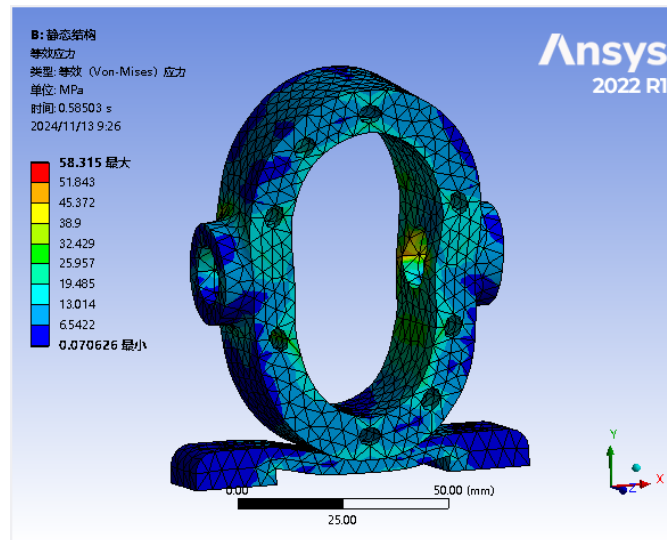


Figure 8. Equivalent stress analysis of gear pump base
图 8. 齿轮泵基座等效应力分析图

根据图 9 所示的齿轮泵基座的弹性应变分布情况，最大弹性应变为 8.30×10^{-4} mm/mm，主要集中在基座内侧与高应力位置相对应的区域。这些高应变区域表明该位置在受力状态下可能是结构的薄弱环节，材料在这些区域发生了较大的弹性变形。在齿轮泵的实际运行过程中，由于承受交变载荷，这些较大的弹性应变区域可能会导致疲劳累积，进而影响整体结构的长期可靠性。然而，当前最大弹性应变值较小，表明在静态载荷条件下，基座能够保持较好的弹性状态，且在材料强度和变形控制方面具有较大的安全裕度。

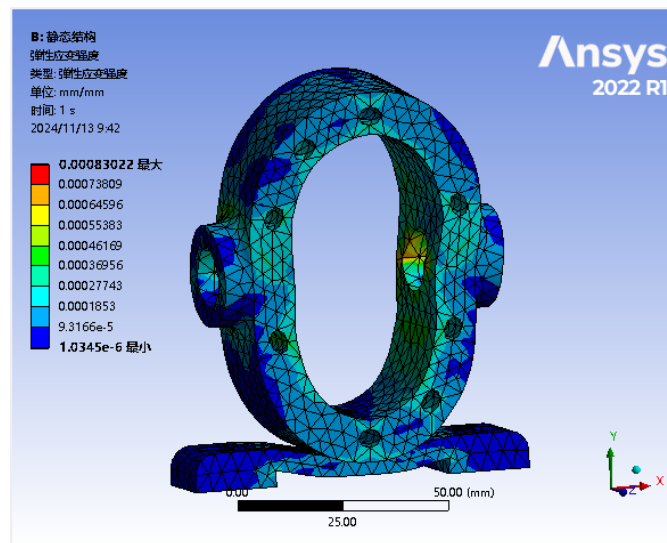


Figure 9. Elastic strain intensity analysis of gear pump base
图 9. 齿轮泵基座弹性应变强度分析图

根据图 10 所示的齿轮泵基座的总变形分布情况，最大总变形为 16.2×10^{-3} mm，主要集中在基座的顶部区域。整体变形呈现出由下到上的梯度分布，基座底部的变形量相对较小，而顶部则显示了较大的变形。这种变形分布表明基座顶部由于受到载荷作用更为显著，导致在静态载荷条件下顶部区域的形变

较大。

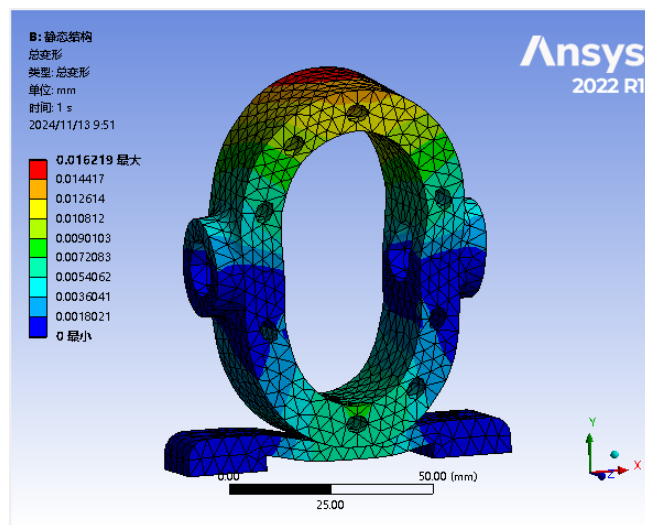


Figure 10. Total deformation analysis of gear pump base hub
图 10. 齿轮泵基座轮毂总变形分析图

4. 轴承结构的六阶模态分析

模态分析是一种用于确定结构在自由振动状态下特性的方法，它可以帮助评估结构的动态行为特性，例如固有频率和振型[7]。在本研究中，通过模态分析来了解齿轮泵基座的固有频率分布和相应的振型，以确保其在实际工作过程中能够避免共振现象，进而保证结构的稳定性和安全性。

在本次模态分析中，利用 ANSYS Workbench 对齿轮泵基座进行了计算，提取了前 6 阶的固有频率和对应的振型，如图 11 所示为固有频率的结果图，振型图如图 12~17 所示。

齿轮泵基座的前六阶固有频率分别为 5863.2 Hz、7102.3 Hz、7102.3 Hz、11,519 Hz、15,551 Hz 和 15,650 Hz。从模态结果可以看出，在各个固有频率下，基座的变形主要集中在顶部和支撑区域，尤其是高阶固有频率下变形较为显著。这些区域是结构的薄弱环节，在这些位置发生较大的振动形变，可能会对齿轮泵的长期稳定性产生影响。

在实际操作中，应尽量避免设备的工作频率接近这些固有频率，以防止由于共振引起的过大形变，导致齿轮泵运行不稳定或损坏。因此，在设计和运行中，需特别注意齿轮泵的工作频率与这些固有频率之间的关系，确保设备的安全运行，并采取必要的减振措施来降低共振风险。

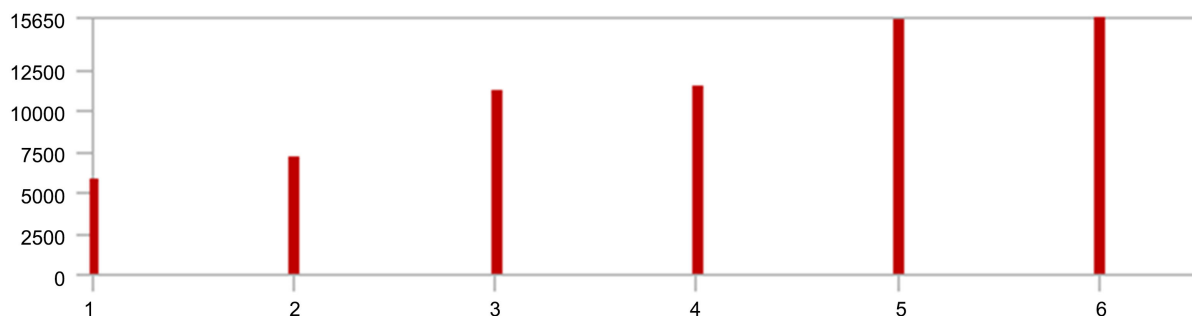


Figure 11. First six natural frequencies
图 11. 前 6 阶固有频率

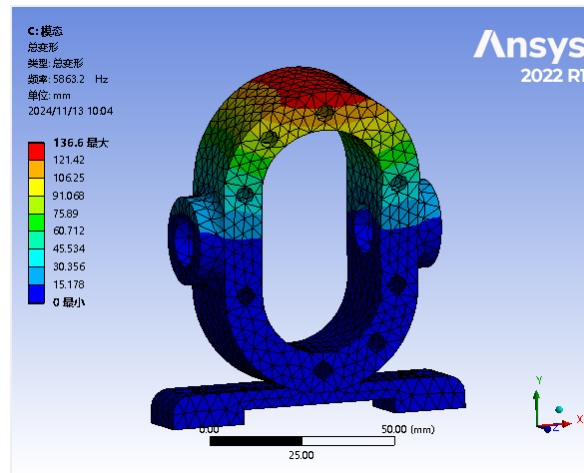


Figure 12. First mode shape
图 12. 第 1 阶模态

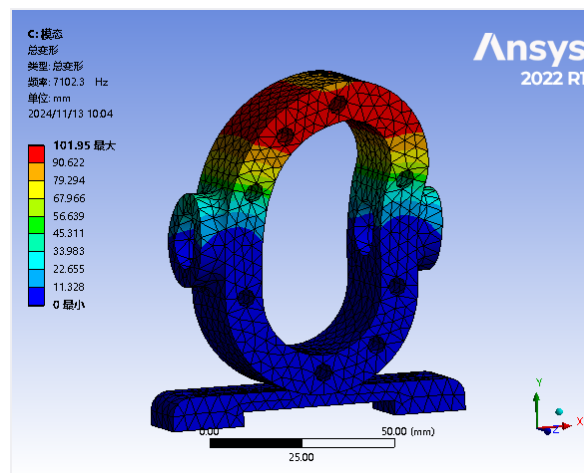


Figure 13. Second mode shape
图 13. 第 2 阶模态

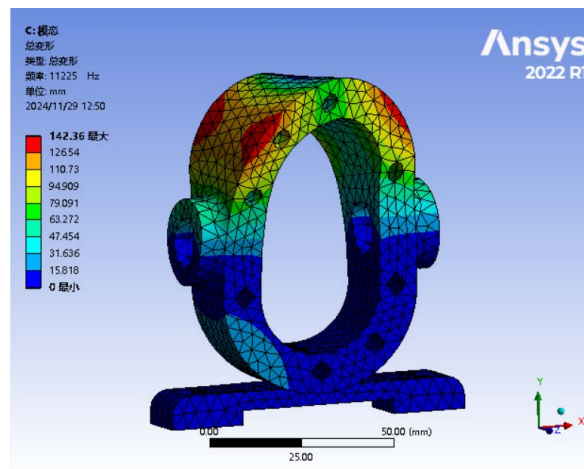


Figure 14. Third mode shape
图 14. 第 3 阶模态

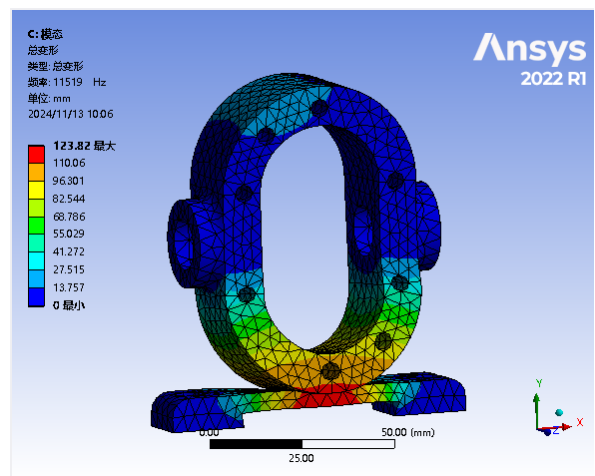


Figure 15. Fourth mode shape
图 15. 第 4 阶模态

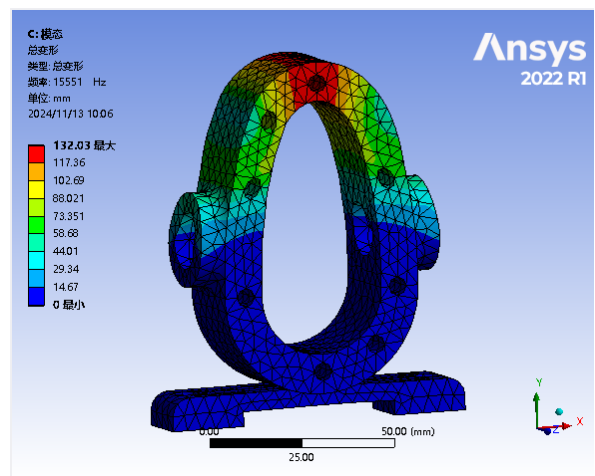


Figure 16. Fifth mode shape
图 16. 第 5 阶模态

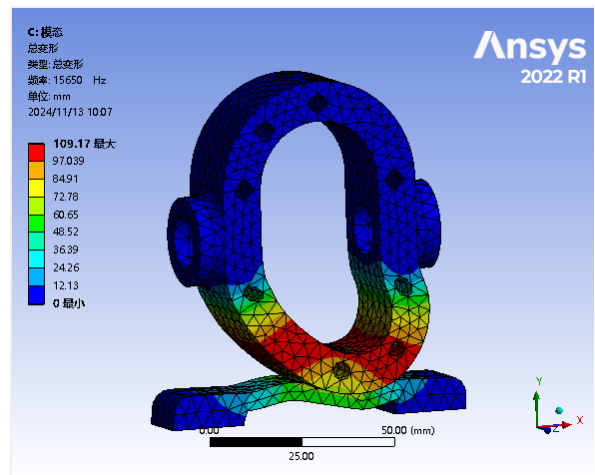


Figure 17. Sixth mode shape
图 17. 第 6 阶模态

5. 谐响应分析

谐响应分析是用于确定结构在特定频率范围内的响应情况的一种方法，通常用于评估结构在周期性激励下的位移、速度和加速度响应。谐响应分析可以帮助工程师了解结构在外部振动载荷作用下的动态特性，从而评估其性能和安全性[8]。

在本次分析中，对齿轮泵基座的侧面进行了谐响应分析，图 18 所示为响应面选取。通过谐响应分析了解了齿轮泵基座侧面在不同频率下的振幅响应情况，结果如图 19~21 所示。

如图 19 所示，X 方向位移响应曲线在 7000 Hz 至 7500 Hz 附近出现了显著的共振峰，最大振幅达到了 8.61×10^{-5} mm。此外，在 15,000 Hz 至 16,000 Hz 之间也有一个较为显著的峰值响应。这表明 Y 方向在这些频率范围内存在较大的振动风险，应特别注意这些频段的设计和运行，采取必要的结构加强或阻尼措施，以降低可能的共振风险。因此，实际设计和运行过程中应避免工作频率接近此频段，以防止因共振导致的结构损伤和不稳定。

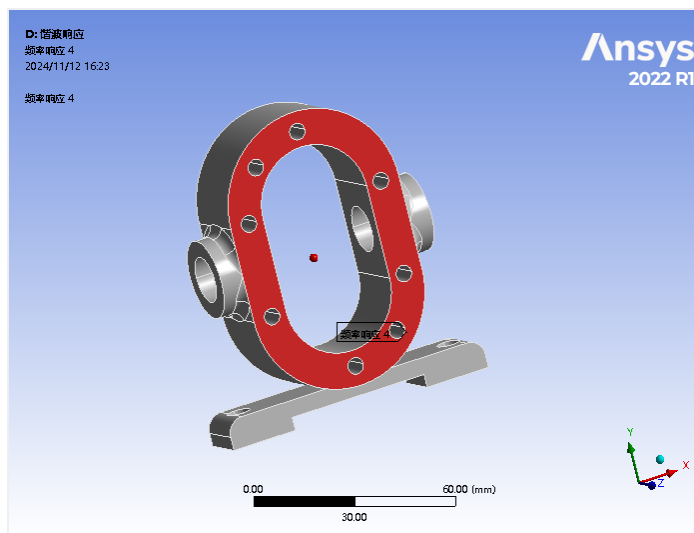


Figure 18. Response surface selection
图 18. 响应面选取

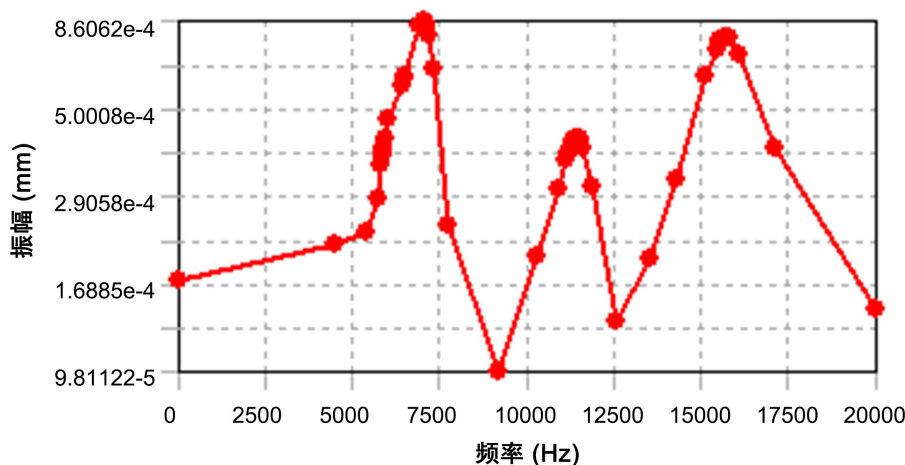


Figure 19. Frequency response curve in X direction
图 19. X 方向频率响应曲线

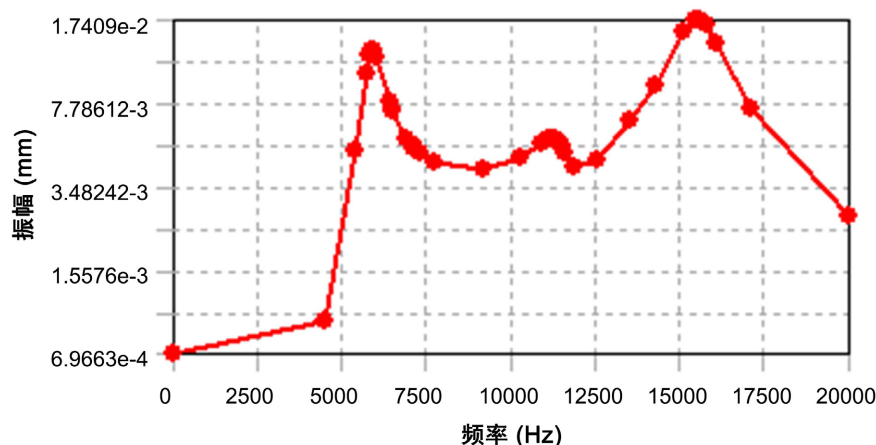


Figure 20. Frequency response curve in Y direction

图 20. Y 方向频率响应曲线

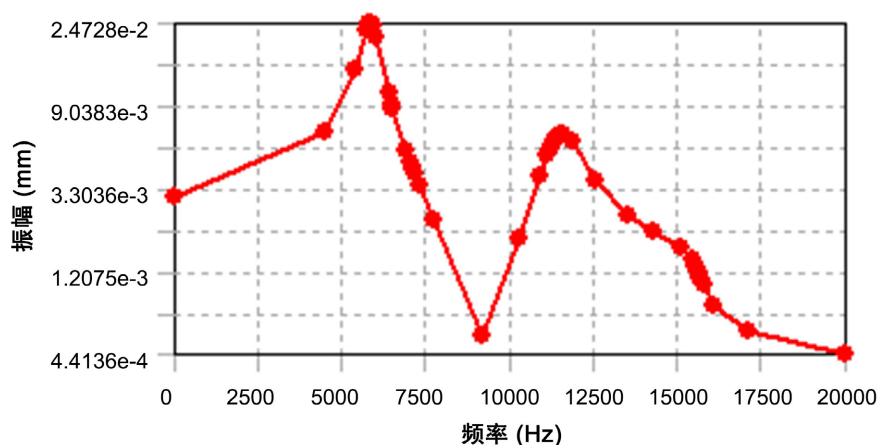


Figure 21. Frequency response curve in Z direction

图 21. Z 方向频率响应曲线

如图 20 所示, Y 方向的位移响应曲线在 7000 Hz 和 15,500 Hz 附近分别出现了较大的振幅, 最大振幅为 1.74×10^{-2} mm。这些振幅峰值表明 Y 方向的响应在这些频率下非常显著, 可能导致结构刚度不足, 并且在高频激励下存在共振的风险。

如图 21 所示, Z 方向的频率响应在 5000 Hz 至 8000 Hz 之间出现了显著的共振峰, 最大振幅为 2.47×10^{-2} mm。虽然该方向的振幅略高于其他方向, 但其在较高频率下的响应较为平稳。这表明 Z 方向的刚度可能在特定频段上有所欠缺, 因此在设备设计和运行中应尽量远离该频率范围。

基于 X、Y、Z 三个方向的频率响应分析, 齿轮泵基座在 5000 Hz 至 18,000 Hz 之间存在显著的共振响应, 尤其在 Y 方向和 Z 方向的频率范围内表现出较大的振动幅度。其中, Y 方向的最大振幅达到了 1.74×10^{-2} mm, Z 方向的最大振幅为 2.47×10^{-2} mm, 显示出这些方向上存在较大的结构应力和变形风险。因此, 在设备的实际运行过程中, 应尽量避免工作频率接近这些共振频段, 以减少共振带来的不利影响。

6. 结论

本文通过对齿轮泵基座进行详尽的有限元分析, 系统地评估了其模态特性和谐响应特性, 为基座的

设计优化与质量控制提供了重要依据。

1) ANSYS 软件的模态分析结果显示, 齿轮泵基座的前六阶固有频率高于齿轮泵正常运行的工作频率, 避免了运行过程中的共振现象, 保障了设备的平稳性和安全性。

2) 谐响应分析表明, 基座在 5000 Hz 至 18,000 Hz 之间存在多个显著的动态响应峰值, 尤其在 Y 方向和 Z 方向振幅最大, 表明基座在高频激励下局部刚度不足, 存在较大变形风险。应尽量避免这些频段, 并通过增加局部刚度、优化结构设计以及引入阻尼材料等措施, 降低动态响应幅度, 提升运行稳定性和可靠性。

综上所述, 齿轮泵基座的设计在静态和动态性能上具备较大安全裕度, 但在高频动态响应方面仍存在改进空间。建议通过提高局部刚度和优化设计, 减少动态响应风险。本研究结果验证了基座设计的合理性和安全性, 为进一步优化提供了方向, 同时也强调了有限元分析在识别和规避共振风险中的重要作用。

参考文献

- [1] 栾振辉. 齿轮泵研究的现状与发展[J]. 起重运输机械, 2005(6): 11-13.
- [2] 俞云飞. 液压泵的发展展望[J]. 液压气动与密封, 2002(1): 2-6.
- [3] 姜鑫. 基于 ANSYS Workbench 的 CB-B 型齿轮泵基座温度场分析[J]. 液压气动与密封, 2016, 36(2): 22-23.
- [4] 宫乙帅, 吴学群, 刘军, 等. 基于变位齿轮的自保护齿轮泵设计[J]. 机械工程师, 2020(8): 133-135+140.
- [5] 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.
- [6] 刘昌领, 陈建义, 李清平, 等. 基于 ANSYS 的六缸压缩机曲轴模态分析及谐响应分析[J]. 流体机械, 2012, 40(8): 17-21.
- [7] 张学亮. 齿轮箱模态分析和结构优化方法研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2010.
- [8] 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.