

基于ANSYS的搬运机械臂小臂有限元分析

李 明, 刘宇超, 史帅杰

上海理工大学机械工程学院, 上海

收稿日期: 2025年1月24日; 录用日期: 2025年2月17日; 发布日期: 2025年2月26日

摘 要

随着机械臂的广泛应用, 对其加工性能的要求也日益提高。小臂作为机械臂的核心部件, 在很大程度上决定了整个机械臂的性能, 包括其结构和功能。针对小臂的可靠性和安全性问题, 本文基于ANSYS软件对机械臂的小臂进行了有限元分析。先利用SolidWorks软件对机械臂小臂进行三维建模, 利用ANSYS进行几何模型的导入, 再基于ANSYS对其进行静力分析, 通过施加不同载荷情况模拟了其在工作过程中的受力情况, 然后结合模态分析以及频率响应特性分析。通过分析结果, 对机械臂小臂的结构进行优化改进, 对比分析两种方案下的机械臂小臂的稳定性和可靠性, 得到优化结果, 从而提高机械臂小臂性能。

关键词

机械臂, ANSYS, 静力学分析, 模态分析, 谐响应分析

Finite Element Analysis of the Small Arm of a Handling Robot Arm Based on ANSYS

Ming Li, Yuchao Liu, Shuaijie Shi

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

Received: Jan. 24th, 2025; accepted: Feb. 17th, 2025; published: Feb. 26th, 2025

Abstract

With the wide application of robotic arms, the requirements for their machining performance are increasing. As the core component of the robot arm, the small arm largely determines the performance of the whole robot arm, including its structure and function. To address the reliability and safety of the arm, this paper is based on ANSYS software to finite element analysis of the arm of the robot arm. SolidWorks software is used to model the arm in three dimensions, ANSYS is used to import the geometric model, and then ANSYS is used to carry out the static analysis, simulate the force during the working process by applying different loads, and then combine with the modal

analysis and the frequency response characteristic analysis. Through the analysis results, the structure of the small arm of the robotic arm is optimized and improved, and the stability and reliability of the small arm of the robotic arm under the two scenarios are compared and analyzed, and the optimization results are obtained, so as to improve the performance of the small arm of the robotic arm.

Keywords

Robot Arm, ANSYS, Static Analysis, Modal Analysis, Harmonic Response 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

机械臂是一种具有多自由度的机械手臂，具有类似于人类手臂的运动能力，可以在工业、医疗、军事、科学研究等领域广泛应用[1]。研究机械臂的意义和价值主要体现在以下几个方面：提高生产效率、改善工作环境、提高产品质量、推动科学研究、拓宽应用领域。

研究机械臂不仅可以推动科技进步和提高生产效率，还可以改善工作环境和提高产品质量，具有重要的意义和价值。而小臂作为机械臂的关键部件，直接影响着机械臂的运动稳定性和精度。进行小臂的力学性能准确的评估和优化设计，对于提高机械臂性能、精准度和可靠性有重要作用，其中机械臂振动分析是至关重要的研究领域[2]。目前在机械臂工程实践中，有限元方法得到广泛应用。张泰源等[3]针对生产线专用锻造机械臂进行轻量化设计，采用有限元软件对机械臂进行极限位置处的静力学分析，采用整体分析和响应面优化相结合的方法，完成对机械臂进行优化设计。郭北涛等[4]以分拣机械手的机械爪为研究对象，利用 Workbench 对单只机械爪进行静力学特性分析，验证机械爪可靠性同时利用响应面法对机械爪进行多目标优化，最终实现机械爪轻量化要求。刘高照等[5]设计了一种冲孔专用机械臂，为了保证机械臂的设计满足强度和刚度要求，对机械臂进行了静力学分析优化，优化效果显著。

本文采用了有限元思想中的静力学分析、模态分析法、谐响应分析方法。而模态分析法用于研究结构的振动特性[6]。通过对机械臂小臂进行模态分析，可以获得其固有频率和相应的振动模式。在进行谐响应分析、瞬态响应分析以及随机振动分析等其他分析之前，首要的步骤是进行模态分析，因为它构成了动力学特性分析的基础[7]。

2. 机械臂小臂的静力学分析

2.1. 零件模型的选择建立及简化

对仿真任务进行细致分析，明确研究的焦点和目标，确定分析的类型和建模要点。然后，根据仿真需求对几何模型进行处理。有两种主要方式来进行有限元分析的几何建模：一是将 3D 模型导入有限元前处理软件；另一是在有限元前处理软件中创建模型。虽然一些细节和结构对有限元分析结果的影响较小，但在网格划分上具有重要影响[8]。通常，根据有限元仿真的目标、类型以及分析的零部件特性，选择最适合的网格类型。接下来，定义材料属性和网格属性。随后，根据有限元分析的类型确定适当的边界条件，并施加荷载。最后，提交给求解器进行计算，然后检查和分析计算结果[9]。

本文选择机械臂小臂为研究对象。对机械臂进行 SolidWorks 三维实体模型的建立，并进行必要的简

化。机械臂在我们的生活中使用得非常广泛，其加工性能的要求也随之提高，其中小臂是机械臂的一个核心部件，它的结构和性能在很大程度上决定了整个机械臂的加工性能，本文选择其中的小臂作为主要的分析对象[10]。模型使用 SolidWorks 软件绘制，如图 1 所示。



Figure 1. Three-dimensional modeling of the small arm
图 1. 小臂三维模型

2.2. 静力学分析预处理

将机械臂小臂模型从 SolidWorks 导入有限元分析软件 Ansys 的 Workbench 应用平台，设置机械臂小臂的材料属性。选取材料性质为结构钢，此材料是机械臂常用的材料，这类材料强度好、抗变形能力强，是应用最广泛的材料。机械臂小臂的材料属性如图 2 所示。

结构钢	
零平均应力下的疲劳数据摘自1998 ASME BPV Code,Section 8,Div 2,Table 5-110.1	
物理	
密度	7.85e-06 kg/mm ²
结构	
各向同性弹性	
弹性	
衍生于	杨氏模量与泊松比
杨氏模量	2e+05 Mpa
泊松比	0.3
体积模量	1.6667e+05 Mpa
剪切模量	76923 Mpa
热膨胀的各向同性割线系数	
热膨胀系数	1.2e-05 1/*C
极限压缩强度	0 Mpa
压缩屈服强度	250 Mpa

Figure 2. Material properties of structural steel
图 2. 结构钢材料属性

在设置好材料的属性后，需要对小臂部件进行网格划分。网格划分是有限元分析流程中的一个重要组成部分，其划分质量直接影响模型的计算精度，为了提高网格质量，需要在网格划分阶段进行严格控制。有限元网格划分是进行有限元数值模拟分析至关重要的一步，它直接影响着后续数值计算分析结果

的精确性。网格划分涉及单元的形状及其拓扑类型、单元类型、网格生成器的选择、网格的密度、单元的编号以及几何体素。

ANSYS Workbench 有限元分析软件提供的网格划分方法有自动网格划分、四面体主导网格划分、六面体主导网格划分等，网格划分的质量会直接影响求解的准确度。因此合理选择网格划分方法并控制网格密度非常重要。细化网格可以使计算结果更加精确，但需耗费更大的存储空间并增加计算时间；而过于粗略的网格会降低计算结果的准确性。由于此次报告是针对零件进行仿真分析，因此需要细化网格的划分，这里选用的网格尺寸为 4 mm，网格划分的示意图如图 3 所示，最终节点总数为 42368，单元总数为 22303。网格划分后，根据小臂在机械臂上的实际位置，确定相对约束和载荷，如图 4 和图 5 所示。后续仿真中的约束及载荷都以这个方式进行。

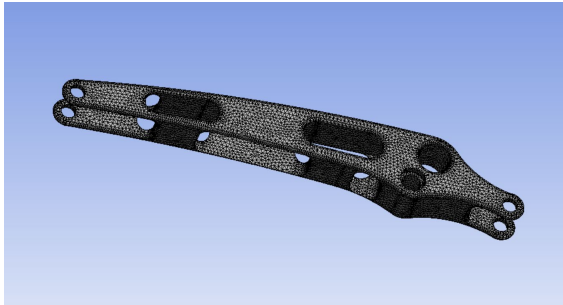


Figure 3. Mesh division of small arm of robotic arm
图 3. 机械臂小臂网格划分

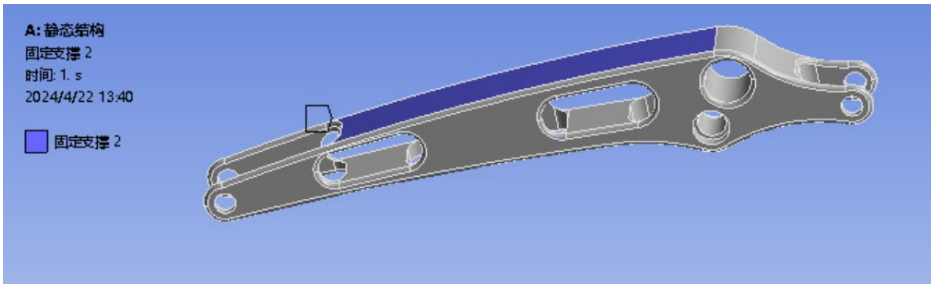


Figure 4. Small arm fixed support setting
图 4. 小臂固定支撑设定

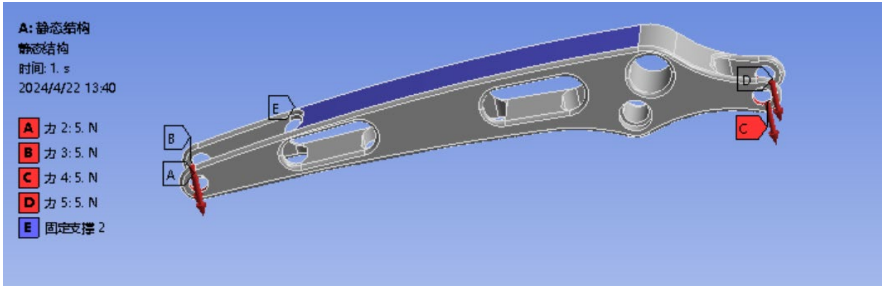


Figure 5. Load constraint setting
图 5. 载荷约束设定

2.3. 静力学分析求解

静力学主要研究物体在力系作用下的平衡规律。静力学里关于力的合成、分解与力系简化的研究结

果,可以直接应用于动力学。因此静力学在工程技术中具有重要的实用意义。这种分析方法包括线性分析和非线性分析。静力分析的主要目标是评估结构在持续恒定静力负载下的行为,而不考虑惯性和阻尼等因素的影响,如结构在受到时间变化的负载时的响应。尽管如此,静力分析可用于估算在稳定静力负载下的惯性效应,并且可以近似处理随时间变化负载的等效静力作用。通常,静力分析用于确定结构物体的位移、约束反力、应力和应变等相关参数。求解完成后得到静力分析结果如图6、图7所示。

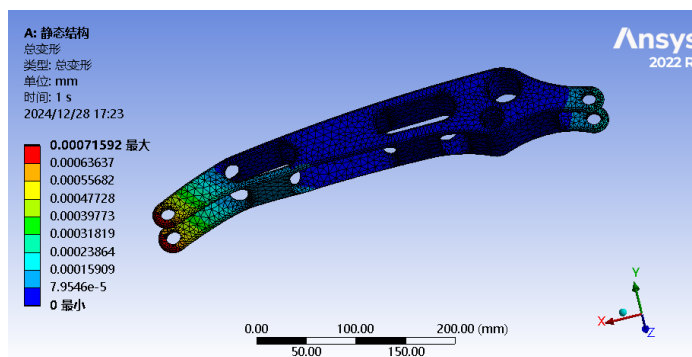


Figure 6. Total displacement cloud map
图6. 总位移云图

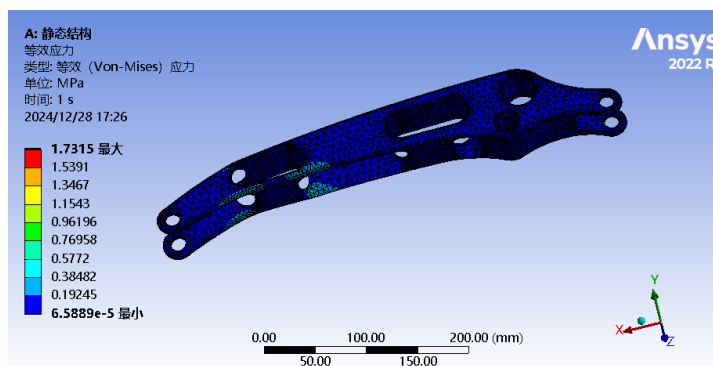


Figure 7. Equivalent force cloud map
图7. 等效应力云图

施加相应约束与载荷后,机械臂小臂的最大位移量为 0.00071592 mm,最大应力为 1.7315 MPa。最大变形发生在小臂两端最薄处,最大应力发生在与底面弯曲最大处。根据机械臂小臂的材料属性要求,机械臂小臂应力及应变都在材料允许范围内。经过有限元分析计算,在直行工况的最大应力和最大变形都在设计的合理范围内,从分析结果可以验证机械臂小臂设计的合理性。

3. 机械臂小臂的模式分析

3.1. 模式分析方法介绍

数值模式分析是以振动理论为基础,首先通过建立线性定常系统的振动微分方程组,再把方程组中的物理坐标转换成模式坐标,使方程组解耦,使其成为一组可用模式坐标和模式参数描述的独立方程,从而可求出系统的模式参数。

模式是机械结构固有振动的特性,每个模式都具有独特的固有频率、振型和阻尼比。进行模式分析是研究结构振动特性的一种方法,它将包含耦合项的联立二阶常微分方程转化为模式坐标系,从而解决耦合

运动方程。通过模态分析，可以计算结构的固有频率和振型。在设计和改进组件时，这些结果可用于确保结构的固有频率与在使用过程中的外部激励频率不重叠。在本研究中，采用了 ANSYS Workbench 的模态分析模块，通过对零件进行网格划分并施加固定约束。通过该模块的求解功能，可以获取前六阶的固有频率。

3.2. 模态分析求解

在第 2 节中已经介绍了机械臂小臂采用的材料为结构钢以及网格划分情况，继续沿用。

在建立的机械臂小臂模型进行静力学分析后，在其基础上再进行模态分析，然后提取前六阶模态分析结果，前六阶模型的固有频率如表 1 所示。

Table 1. First six natural frequencies

表 1. 前六阶固有频率

阶数	固有频率/Hz
1	464.69
2	491.86
3	1090.9
4	1467.5
5	2051.4
6	2119.9

由表 1 可知小臂模型的固有频率主要集中在 400 Hz~1100 Hz，对小臂模型的固有频率进行分析，在机械臂的实际工作过程中，要避免振动频率与转盘模型固有频率相同或成倍数的激振力。

机械臂小臂模型前六阶相应的模态振型如图 8 所示。

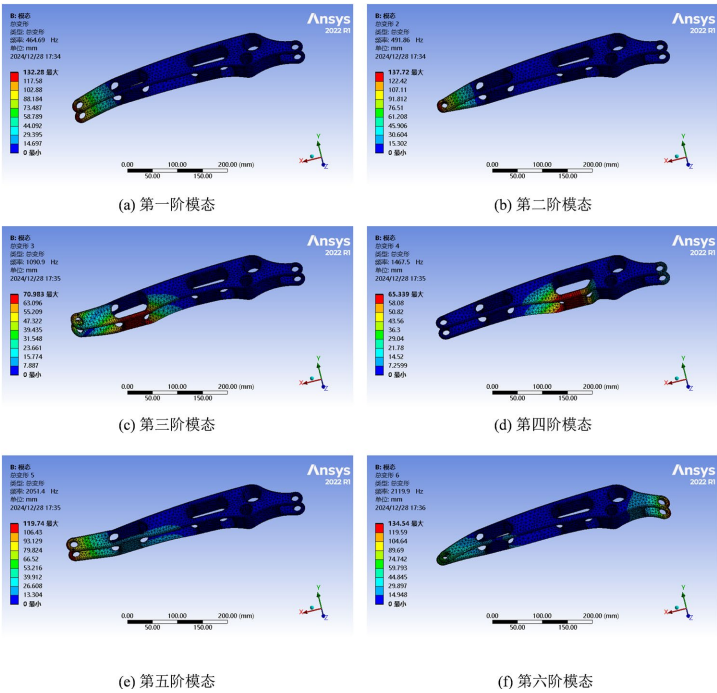


Figure 8. Sixth order modal shape diagram
图 8. 六阶模态振型

4. 机械臂小臂的谐响应分析

4.1. 谐响应分析理论

谐响应(Harmonic Response)分析,是用于确定线性结构在承受简谐载荷时的稳态响应的技术。是一种频域分析,用于确定结构在已知频率和幅值的正弦载荷作用下的稳态响应,其主要用于确定线性结构的稳态响应,从而可以帮助人们预测结构的持续动力特性。谐响应分析以模态分析为基础,可以确定机构在承受按照正弦(简谐)规律变化的载荷时的稳态响应,可以反映出结构在受到不同频率简谐载荷作用下自身的运动特性。谐响应分析的目的在于验证设计是否能克服共振、疲劳以及其他受迫振动引起的有害效果。在特定的环境下,对模型支撑结构做谐响应分析就是为了得到模型支持结构的振幅位移和对应的频率值,从而找到最大振幅对应的频率值,这个频率下即为共振点[11]。

4.2. 谐响应分析求解

在模态分析的基础上,将模态分析结果导入到谐响应功能模块进行分析。由定义机械臂小臂材料为结构钢,保持小臂的材料属性、载荷施加和约束条件与模态分析时一致。根据前六阶模态频率,设置频率范围为 400 Hz~1100 Hz,本次分析选择对其位移响应进行分析,最后可以得到施加载荷下所对应的零件位移响应曲线,如图 9 所示。

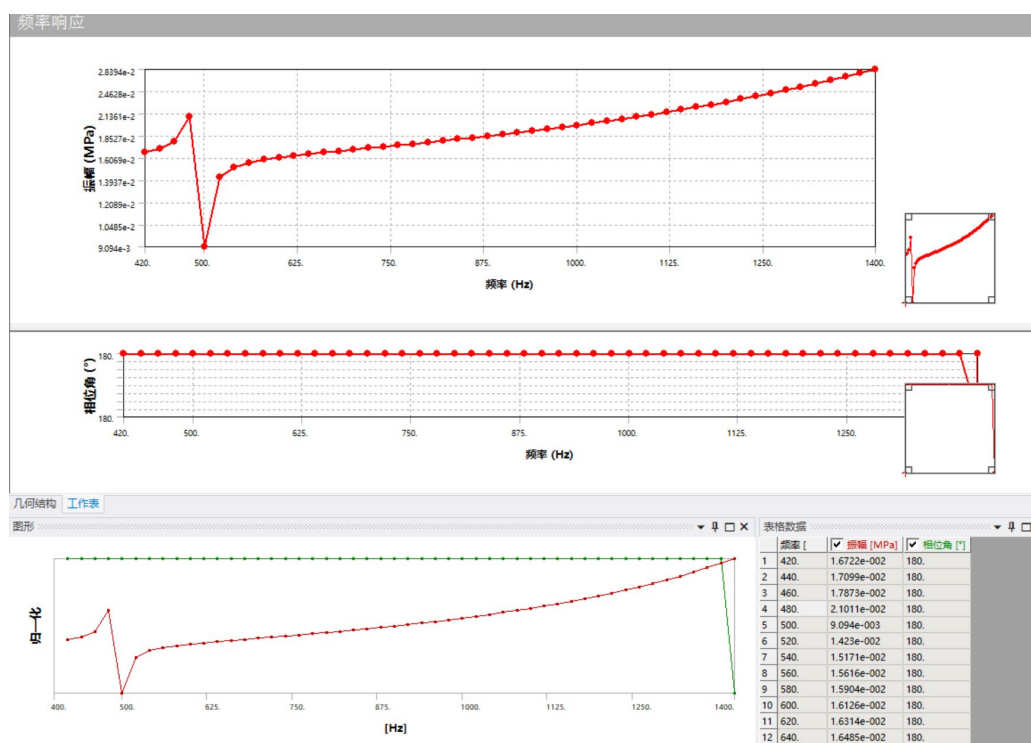


Figure 9. Frequency response analysis chart

图 9. 频率响应分析

由上图 9 知,在对机械臂小臂施加载荷时,在 484 Hz 时, X 的方向达到最大幅值为 1.3×10^{-7} mm 从 X 方向的激振频率与幅值关系可以看出,在 400~1100 Hz 的频率范围内,机械臂小臂主要出现了 1 个共振点,其中 X 向约在 484 Hz 处出现最大共振峰值,由上文的模态分析可知,这个频率接近机械臂转盘的六阶模态,说明此频率下小臂可能发生了共振,并且振动比较严重,因此应该避开危险频域。

5. 机械臂小臂的优化设计

5.1. 模型优化

根据机械臂小臂在实际使用中的工况，再结合静力学分析可知其最大变形发生在小臂顶端，最大应力发生在小臂尖端根部处。所以需对模型进行优化处理，将小臂两端顶部由原来单 6 mm 的厚度增加到单边 10 mm 的厚度优化后的零件如图 10 所示。



Figure 10. Optimized robotic arm forearm model
图 10. 优化后的机械臂小臂模型

5.2. 模型优化结果对比分析

将优化后的转盘模型导入到 ANSYS Workbench 中进行静力学分析、模态分析及谐响应分析，在网格划分、载荷及约束的施加与原先相同的情况下，优化后小臂的最大变形、最大等效应力及最大等效应变都有所减小，如表 2 所示，然后再对优化后的小臂进行模态分析，取前六阶模态的固有频率进行对比，可以看到前四阶固有频率有所提高，第五阶第六阶有所下降，如表 3 所示。

Table 2. Static analysis comparison

表 2. 静力学分析对比

物理量	单位	优化前	优化后
最大变形	mm	0.00071592	0.00042955
最大等效应变	mm/mm	1.1618e-5	6.971e-6
最大等效应力	Mpa	1.7315	1.0389

Table 3. Comparison of natural frequencies of the first six modes

表 3. 前六阶固有频率对比

阶数	优化前固有频率/Hz	优化后固有频率/Hz
1	464.69	584.38
2	491.86	601.42
3	1090.9	1172.3
4	1467.5	1532.2
5	2051.4	1980.3
6	2119.9	2000.4

6. 结论

本文以机械臂小臂为研究对象，重点分析了其小臂部分的静力学特性和振动特性。首先，利用 SolidWorks 软件对机械臂小臂进行了三维建模，并在建模过程中对小臂的非关键部位进行了适当简化，以降低计算复杂度。随后，将建好的模型导入到 Ansys 软件中，进行了网格划分，通过施加不同的载荷，模拟机械臂小臂在工作过程中的受力情况，分析其位移、应力和应变等参数，验证设计的合理性。根据分析结果验证了机械臂小臂设计的合理性，其应力及应变都在材料允许范围内。强度校核结果显示，小臂的结构强度满足设计规范，能够承受预期的最大工作载荷。

在此基础上，本文还对机械臂小臂进行了模态分析，以确定其在不同固有频率下的动态响应。通过分析，我们确定了小臂共振频率和振幅。这些参数为后续动力特性的优化设计提供了关键数据，最后，本文对小臂模型进行了谐响应分析，目的是确定小臂在不同频率下的振幅位移响应。通过这一分析，成功找到了小臂的最大振幅对应的频率值，即共振频率。这一发现对于预防小臂在实际工作中因共振导致的损坏至关重要。基于谐响应分析的结果，本文还对小臂进行了针对性的优化设计，优化后的小臂模型再次通过有限元分析进行了验证，结果表明：优化设计有效降低了小臂在共振频率下的振幅，显著提高了小臂的动态稳定性。优化后的小臂在保持原有功能的同时，其结构强度和耐久性得到了进一步提升。

本研究不仅为机械臂小臂的设计提供了科学依据，也为类似机械结构的振动分析和优化提供了宝贵的参考。综上所述，本研究通过系统的振动分析和优化设计，显著提升了机械臂小臂的性能，为其在工业应用中的可靠性和安全性提供了有力保障。

参考文献

- [1] 赵忠杰. 基于 ANSYS Workbench 软件在轴承座模态分析中的应用[J]. 防爆电机, 2022, 57(1): 27-28, 42.
- [2] 吴彬, 佟静, 张晓红, 陆文金, 奚霞. 基于 Ansys Workbench 的 RV 减速器曲柄轴模态分析[J]. 南方农机, 2020, 51(23): 100-101.
- [3] 张泰源, 张继忠, 崔向贵, 等. 专用锻造机械臂轻量化设计及仿真分析[J]. 青岛大学学报(工程技术版), 2021, 36(3): 6-11, 21.
- [4] 郭北海, 代国辉. 基于 Ansys Workbench 分拣机械手爪的仿真与优化[J]. 山西焦煤科技, 2022, 46(9): 4-8.
- [5] 刘高照, 管殿柱, 施磊, 等. 锻造专用机械臂的结构有限元分析及优化设计[J]. 锻压技术, 2024, 49(5): 160-165, 178.
- [6] 王俊跃, 戴晓军, 王聪伟, 鲍志亮, 高磊, 张平. 基于 ANSYS Workbench 的方捆机刀架静力学与态分析[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(12): 9-16.
- [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] 陈焕明, 蒋荣超. 基于流程模板的有限元分析教学研究[J]. 科技视界, 2020(36): 53-55.
- [9] 张永欣, 王耀仑, 杨超凡, 等. 覆盖约束层阻尼的柔性机械臂抑振仿真分析[J]. 力学与实践, 2022, 44(6): 1332-1341.
- [10] 胡义华. 抓取机械手的动力学性能及结构有限元仿真[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2021, 35(5): 508-512.
- [11] 喻宁娜, 莫胜撼. 工业机器人机械臂加强装置优化设计研究[J]. 造纸装备及材料, 2023, 52(7): 36-38.