

基于ANSYS的机械臂下料瞬态有限元分析

于晓浦

上海理工大学机械工程学院，上海

收稿日期：2025年9月4日；录用日期：2025年9月12日；发布日期：2025年10月13日

摘要

机械臂凭借高精度、高效率和高可靠性，广泛应用于制造、医疗、物流、农业、服务、科研、军事、建筑和娱乐等领域，推动了自动化和智能化的发展。为了评估其在制造零件下料过程中各个关节的结构强度并确保其在实际应用过程中不会发生破损或变形，本文先利用SolidWorks对机械臂进行三维建模，通过建立运动学模型来准确地描述各个连杆之间的位置关系，再利用ANSYS进行几何模型的导入，最后基于ANSYS Workbench对运转中的机械臂进行瞬态分析，通过这些分析，深入了解了机械臂在不同运行工况下的力学特性，这对于提高机械臂在下料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

机械臂，三维建模，ANSYS Workbench，瞬态分析

Robotic Arm Underfeed Transient Finite Element Analysis Based on ANSYS

Xiaopu Yu

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

Received: September 4, 2025; accepted: September 12, 2025; published: October 13, 2025

Abstract

With high precision, high efficiency, and high reliability, robotic arms are widely used in the fields of manufacturing, medical, logistics, agriculture, service, scientific research, military, construction, and entertainment, promoting the development of automation and intelligence. In order to evaluate the structural strength of each joint in the process of manufacturing parts feeding to ensure that it will not be broken or deformed in the process of practical application, this paper first uses SolidWorks to carry out 3D modeling of the robotic arm, accurately describes the positional relationship

between each linkage by establishing kinematics model, and then uses ANSYS to import the geometric model, and finally, based on ANSYS Workbench transient analysis of the running mechanical arm, through these analyses, an in-depth understanding of the mechanical properties of the mechanical arm in different operating conditions, which is important for improving the stability and reliability of the mechanical arm in the process of discharging materials, and for the subsequent optimization of the design provides a theoretical basis and technical support.

Keywords

Robotic Arm, Three-Dimensional Modeling, ANSYS Workbench, Transient 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

动态仿真在机械臂的设计、控制、安全性、成本节约、培训、复杂环境模拟和实时控制等方面具有重要作用，是提升机械臂性能和可靠性的关键工具[1]。机械臂动态仿真分析至关重要，它能有效验证设计方案的可行性，优化机械臂的运动轨迹，提前发现并解决潜在问题，如碰撞与干涉，显著降低研发和生产成本，同时促进定制化设计，确保机械臂在实际应用中高效、安全地运行[2][3]。马骥等[4]在 ADAMS 中对机械臂一个工作周期的运动过程进行了仿真，从而获得了各个关节在该周期内的力矩变化曲线；黄利坚、吴哲、王宁等[5]在 Ansys Workbench 软件中对上下料机械臂的基座和大臂进行静力学仿真分析；林先晶、戴程浩、江维等利用 ADAMS 软件建立纱筒换料六自由度抓取机械臂的动力学仿真模型，通过动力学仿真模拟作业流程，利用后处理功能获取各关节力学曲线验证机械臂抓取的可靠性。现有研究多集中于静力学或运动学，对特定工况下的动态应力响应研究不足，因此本文研究重点在于评估机械臂下料过程中在运行状态下的力学性能，并通过仿真分析结果验证其设计的合理性和安全性[6]。通过动力学分析评估机械臂在下料运行过程中的整体变形和应力分布结果，识别结构中的薄弱环节，并单独提出大臂和小臂部件进行分析，为机械臂在下料过程中各个部件的变形和受力情况提供理论依据[7]。

2. 下料机械臂模型的建立

2.1. 下料机器人三维模型的建立

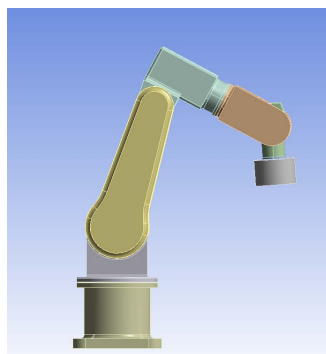


Figure 1. Robotic arm 3D model drawing

图 1. 机械臂三维模型图

本文通过三维建模软件 SolidWorks 对机械臂进行三维建模，用于模仿机械臂的下料过程，总共有 5 个转动关节和一个末端夹具，转动关节从下到上分别为腰部、肩部、大臂、小臂、腕部，用于机械臂的整体转动，使机械臂到达要求的位置上。腕部能够完成各种角度的调整，用于夹具的下料。将机械臂的三维模型导入到有限元仿真软件中，以便后续的瞬态有限元分析，结果如图 1 所示。

2.2. 下料机械臂坐标系与参数的确立

为了能够准确地描述各个连杆之间的位置关系，可以利用标准 D-H 法和自身连杆参数建立运动学模型，D-H 参数法按照设定规则为每个连杆固连了一个坐标系，之后就可以方便地描述一个连杆坐标系到相邻的下一个连杆坐标系的转换关系。实质就是把相邻坐标系的转换分解为了若干个步骤，每个步骤均只有一个参量，这几个步骤对应变换的组合就完成了相邻坐标系的变换，建立的下料机器人的坐标系如图 2 所示，计算得到下料机械臂 D-H 参数模型如表 1 所示。

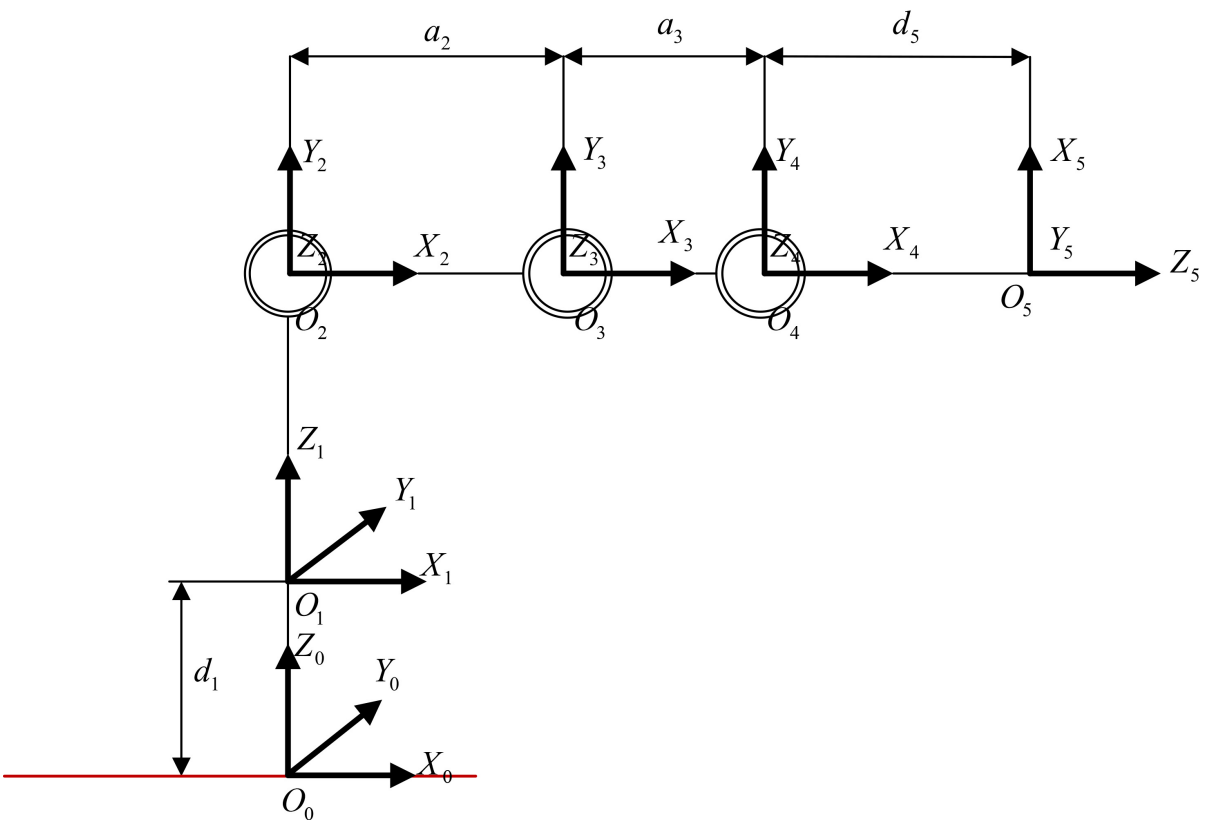


Figure 2. Coordinate system of the joints of the unloading robot
图 2. 下料机器人各关节坐标系

Table 1. Parametric modeling of the lowering robot arm D-H
表 1. 下料机械臂 D-H 参数模型

关节序号	$\alpha_{i-1} / ^\circ$	杆长 a/mm	距离 d/mm	转角 $\theta / ^\circ$	转动范围/ $^\circ$
1	90	0	25	θ_1	± 150
2	0	120	0	θ_2	± 90
3	0	100	0	θ_3	± 120

续表

4	90	0	0	θ_4	± 120
5	0	0	180	θ_5	± 120
6	0	0	0	θ_6	± 90

2.3. 下料机械臂坐标系运动学分析

在标准 D-H 参数法中, 通过对每个连杆定义坐标系并计算它们之间的相对变换矩阵, 将所得矩阵依次相乘, 便可得出机械臂基座到末端执行器的完整位置和姿态变换关系。然后将各个关节之间变换矩阵连续相乘即可得到运动学方程。相邻杆件之间的齐次变换矩阵计算公式如下所示:

$${}^{i-1}T_i = \begin{pmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin \theta_i \cos a_{i-1} & \cos \theta_i \cos a_{i-1} & -\sin a_{i-1} & -d_i \sin a_{i-1} \\ \sin \theta_i \sin a_{i-1} & \cos \theta_i \sin a_{i-1} & \cos a_{i-1} & d_i \cos a_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

通过代入连杆参数求出的各关节齐次变换矩阵并依次相乘得到机械臂运动学方程:

$${}^0T_6 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 {}^5T_6 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

通过该运动学方程, 可以方便地计算末端执行器的位置和姿态。

3. 基于 ANSYS Workbench 的瞬态动力学分析

本章节利用 ANSYS Workbench 对机械臂进行瞬态动力学分析, 评估其在瞬态载荷下的结构性能。首先, 通过几何结构模块建立机械臂模型, 在瞬态结构模块中定义材料、施加连接副条件和瞬态分析条件, 进行求解以获得应力和变形结果, 通过所得的瞬态动力学分析结果来评估机械臂下料过程中的受力和变形, 为结构设计优化提供数据支持。

3.1. 瞬态动力学分析

瞬态动力学分析指的是在时间变化的情况下, 分析机械机构连续时间段内所发生的载荷力学响应。不同于静力学分析, 瞬态分析主要是针对随着时间的变化, 研究目标中一系列行为的改变, 包括: 阻尼、负载、系统惯性。在三大载荷的任意组合下, 确定研究目标的应力-应变关系以及位移的状态等变化程度, 基本公式如式(3)所示:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F(t)\} \quad (3)$$

其中: $[M]$ 代表质量矩阵, $[C]$ 代表阻尼矩阵, $[K]$ 代表刚度矩阵。当 $[M]$ 、 $[C]$ 都为0时, 该公式就成了静力学公式: $\{\ddot{u}\}$ 、 $\{\dot{u}\}$ 、 $\{u\}$ 分别代表的是 u 节点的加速度向量、速度向量和位移向量。根据瞬态动力学理论, 运用 ANSYS Workbench 软件进行分析就能得到分析目标的动态响应性能。

3.2. 瞬态动力学分析预处理

将机械臂模型从三维软件 SolidWorks 导入有限元分析软件 ANSYS Workbench 中, 设置机械臂的材料属性为结构钢, 工件材料设置为聚乙烯, 这是因为结构钢在机械臂中被广泛应用, 而且结构钢具有材

料强度高、材质均匀、结构可靠性高、抗变形能力强等优点。图 3 所示为机械臂的材料属性，图 4 所示为工件的材料属性。

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	7850 kg/m ³
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+11 Pa
泊松比	0.3
体积模量	1.6667e+11 Pa
剪切模量	7.6923e+10 Pa
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 Pa
压缩屈服强度	2.5e+08 Pa

Figure 3. Material properties of robotic arms
图 3. 机械臂的材料属性

聚乙烯	
物理	
密度	9.5e-07 kg/mm ³
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	1100 MPa
泊松比	0.42
体积模量	2291.7 MPa
剪切模量	387.32 MPa
热膨胀的各向同性割线系数	
热膨胀系数	0.00023 1/°C
极限压缩强度	0 MPa
压缩屈服强度	0 MPa
拉伸极限强度	33 MPa
拉伸屈服强度	25 MPa

Figure 4. Material properties of workpieces
图 4. 工件的材料属性

在材料属性设置完成后，先在几何结构中找到工件，将刚度行为设置成刚性，如图 5 所示，也就是把工件等效为一个质量点，不参与有限元的网格划分等计算，之后删除原有的接触关系；然后以连接副来代替关节之间的自由度限制。首先是设置机械臂底部的固定，然后进行腰部与机械臂底座等各部件之间的相对参照和旋转的设置，最后将工件固定在机械臂上，如图 6 所示；然后进行机械臂的网格划分。在有限元的分析计算中，网格划分对计算结果的准确度有着重要的影响，在有限元分析软件 ANSYS Workbench 中，网格划分的方法有四面体主导、六面体主导网格划分以及自动网格划分等，因此细化网格划分尤其重要，本次采用四面体划分网格的方法，单元尺寸选择 25 mm，划分的网格示意图如图 7 所示，最终节点总数为 60,159，单元总数为 32,465。

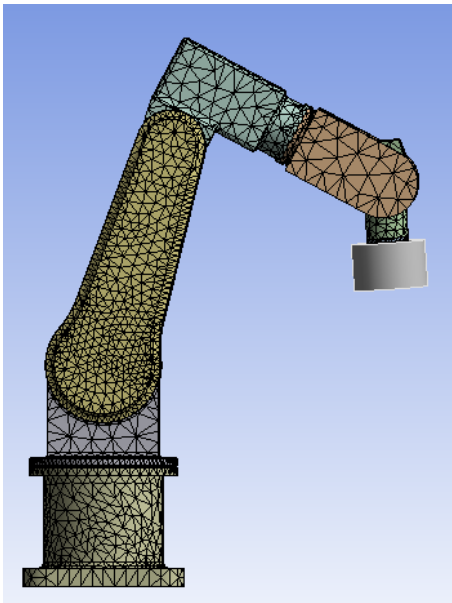


Figure 7. Schematic diagram of robotic arm meshing
图 7. 机械臂网格划分示意图

[-] 步控制	
步骤数量	1.
当前步数	1.
步骤结束时间	3.s
自动时步	开启
定义依据	子步
初始子步	25.
最小子步	20.
最大子步	250.
时间积分	开启

Figure 8. Analyze settings
图 8. 分析设置

在网格划分完成后,进行瞬态的设置,将分析设置的步骤结束时间设置为 3,初始子步调整为 25,最小子步调整为 20,最大子步调整为 250,如图 8 所示,本文只需要三个关节运动即可,所以插入三个连接副载荷,让第一个关节在第一秒就旋转 30 度,让第二个关节在第二秒旋转 15 度,让第三个关节在第三秒的时候旋转 30 度,让第四、五、六关节固定,如图 9 所示,在最后加上一个标准的地球重力,方向沿着 y 方向。

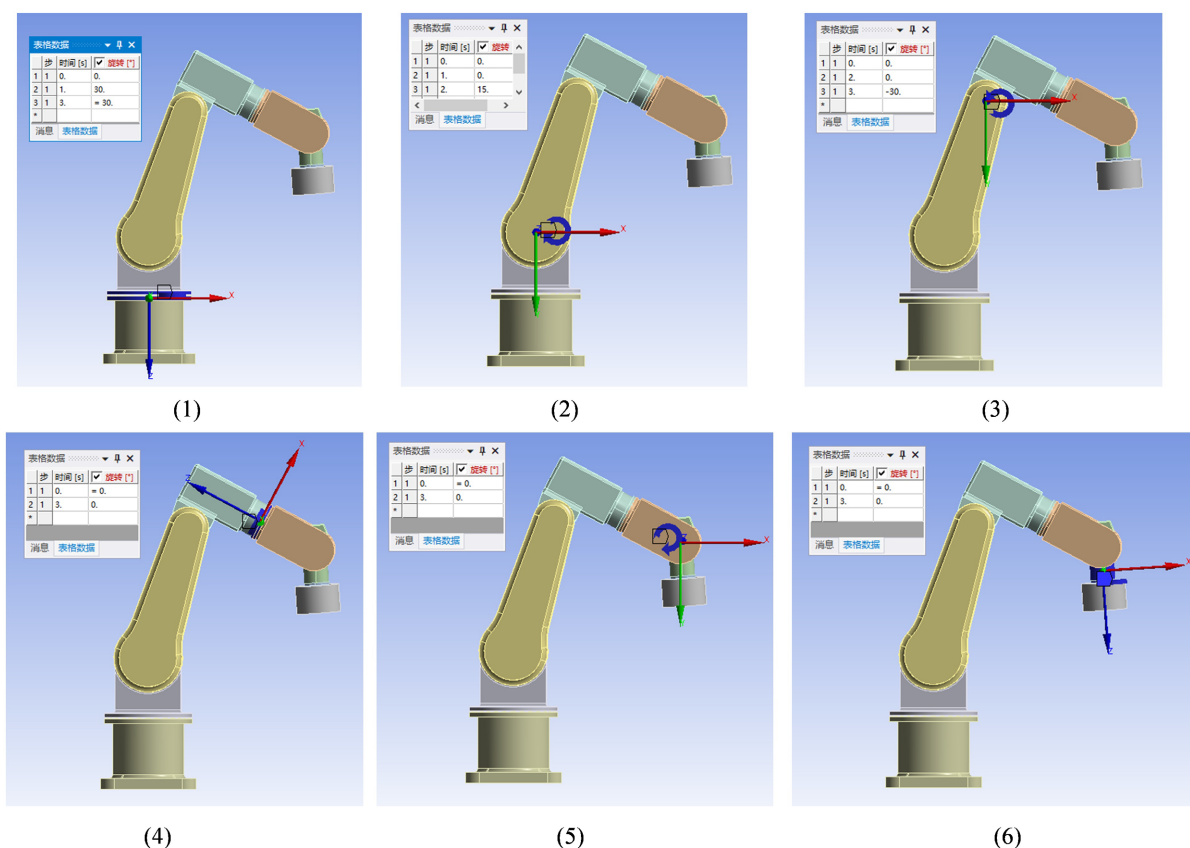


Figure 9. Transient connection sub-setting
图 9. 瞬态连接副设置

3.3. 整体瞬态分析求解

瞬态分析是结构有限元分析中非常重要的模块,用于动态的分析方法,分析载荷随时间变化的结构的动力学响应的方法,以及确定结构在受到稳态载荷、瞬态载荷和简谐载荷的随意组合下随时间变化的位移、应变和应力。由于机械臂在下料过程中,各个关节在运动过程中摆动的频率不同,因此它们所受的载荷也不同,因此本次的瞬态分析是模拟机械臂在下料过程中总体变形和受力情况。总变形图如图 10 所示,从总变形图结果中可以看出,机械臂的腕部变形较大,达到了 425.61 mm,这是由于瞬态分析不同于静力学分析,机械臂在瞬态分析中会考虑到空间的位移,在机械臂的腰部和大臂的旋转过程中,腕部在空间中的位移比较大,因此腕部的变形是最大的,小臂、大臂到腰部的变形量依次递减。等效应力如图 11 所示,从等效应力图中不难看出,腰部所受的应力最大,腰部的应力最大是由于机械臂在下料的过程中需要支撑大臂、小臂、腕部以及夹具的整体重量,导致在下料方向上的应力最大,最大应力为 5.4506 MPa。

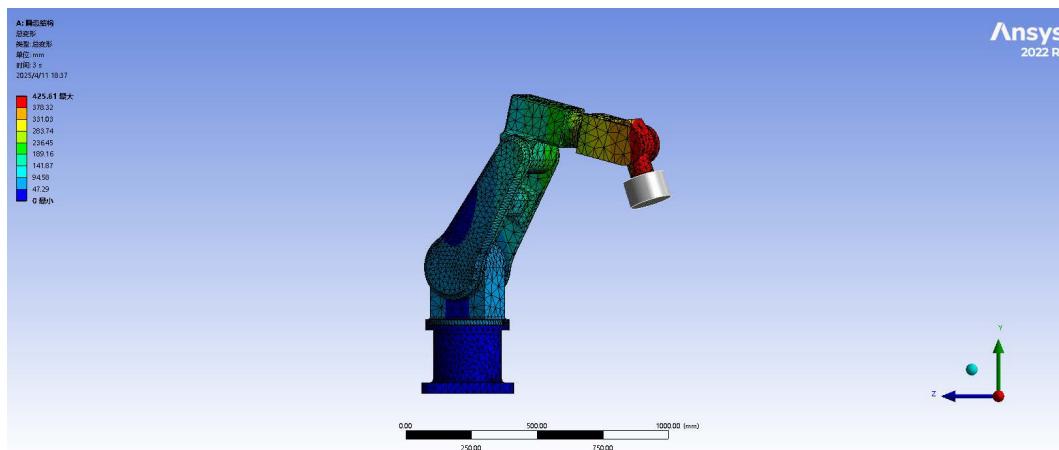


Figure 10. Overall deformation diagram

图 10. 整体变形图

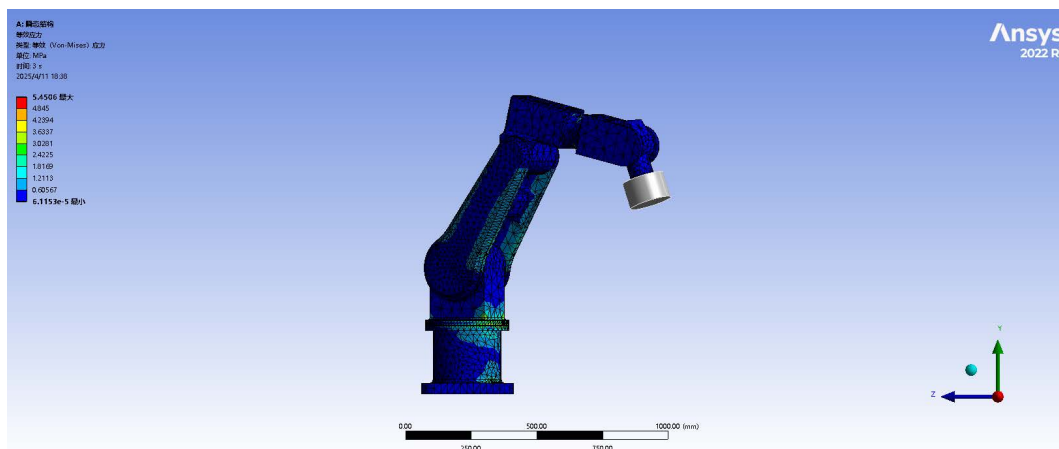


Figure 11. Global equivalent force diagram (GECD)

图 11. 整体等效应力图

3.4. 大臂瞬态分析求解

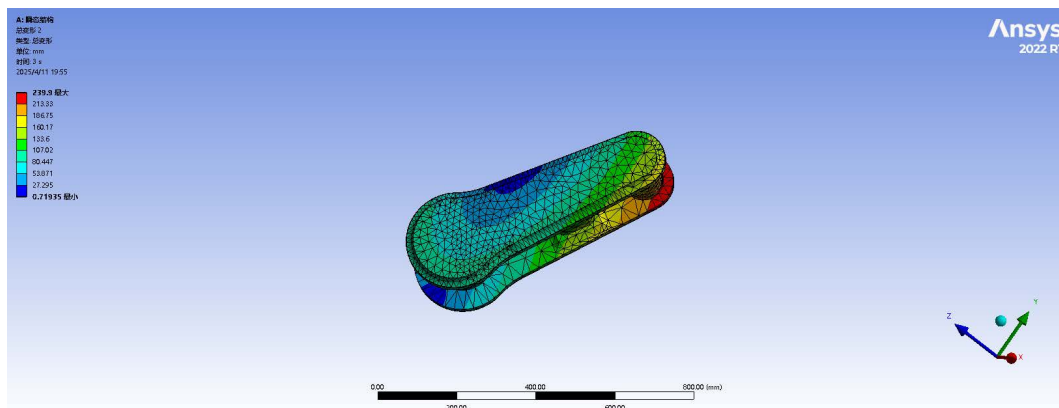


Figure 12. Big-arm deformation diagram

图 12. 大臂变形图

通过整体的等效应力图，可以看出大臂所受应力也比较大而且集中，故单独提取大臂的形变图和等效应力图，大臂的变形图如图 12 所示，从中看出，大臂的变形量在与小臂连接的地方变形最大，最大变向量为 239.9 mm。这是因为在空间运动中，大臂与小臂连接处的空间位移量是最大的，其他部位在空间上的位移依次减少，从而形成了如图 12 所示的变形图；大臂的等效应力图如图 13 所示，可以明显看出，大臂在中间的等效应力是最大的，达到了 1.5398 MPa，出现了应力集中。这是由于大臂处于悬空状态并且需要支撑小臂、腕部以及工件和夹具，导致受力都集中于大臂两侧金属片靠近工件的外端。

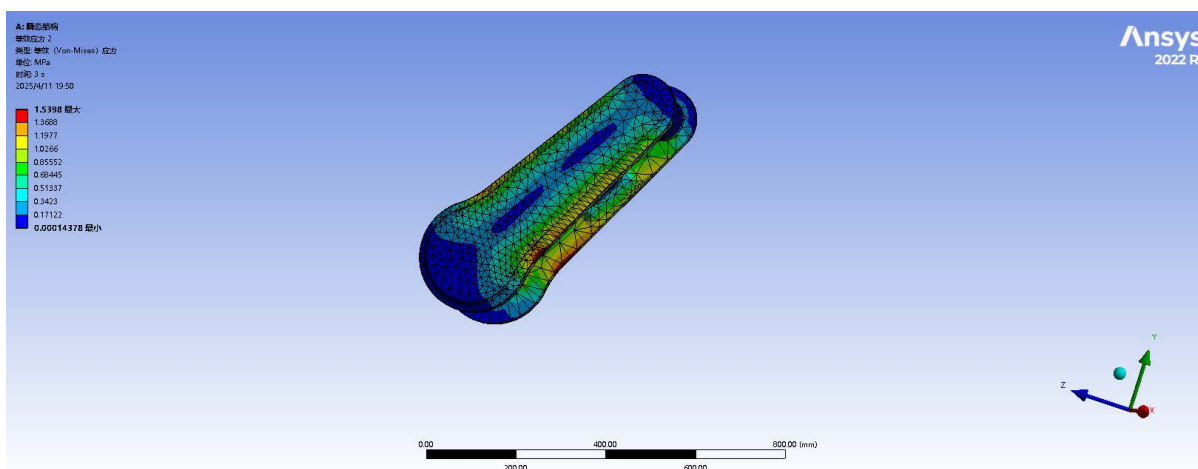


Figure 13. Big-arm equivalent force diagram

图 13. 大臂等效应力图

3.5. 小臂瞬态分析求解

通过整体变形图可以看出小臂与手腕处的变形量是最大的，所以单独提取了小臂的变形图和等效应力图，小臂的变形图如图 14 所示，从图 14 中看出小臂的末端的变形量达到了整体变形量中的最大值，为 425.61 mm，这说明小臂在整个机械臂中的空间位移量是最大的；小臂的等效应力如图 15 所示，从图中看出应力的最大值为 1.2978 MPa，主要用于支撑腕部和工件。

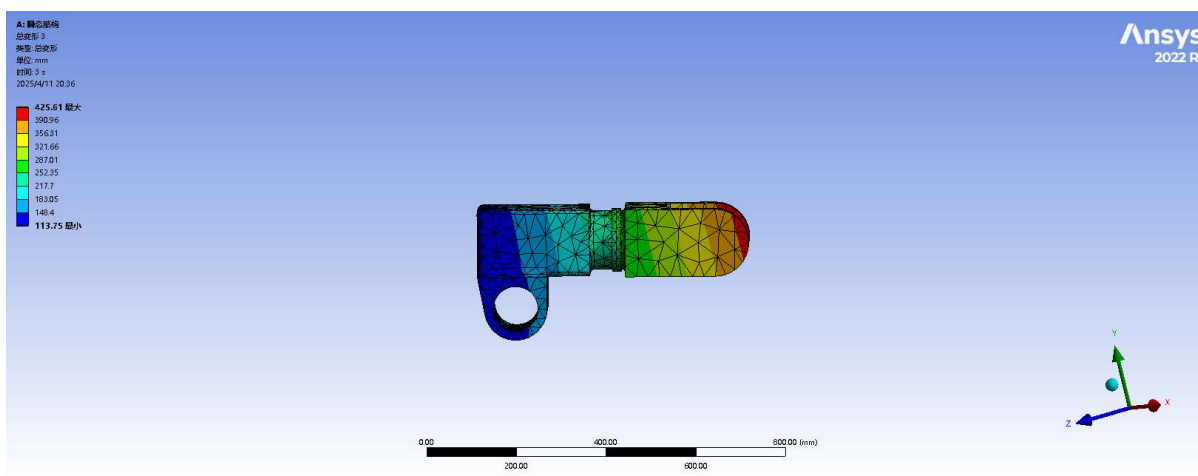


Figure 14. Small-arm deformation diagram

图 14. 小臂变形图

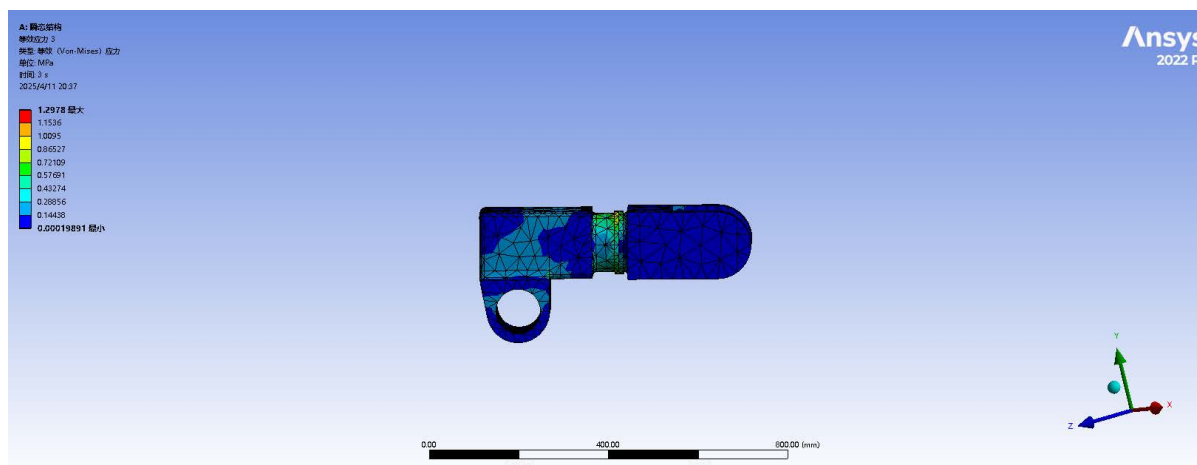


Figure 15. Small-arm equivalent force diagram

图 15. 小臂等效应力图

4. 结论

本文以机械臂为研究对象，重点分析了机械臂的瞬态动力学分析，并从中提取了大臂和小臂的瞬态运动学分析结果。首先，通过 SolidWorks 进行三维建模，将其导入 ANSYS Workbench，进行了材料属性、连接副的设定，以及网格的划分，最后通过瞬态中各个部件连接的设定，模拟机械臂的下料过程，分析了机械臂整体的变形和等效应力，从中还提取了大臂和小臂的变形和等效应力进行分析，验证了设计的合理性。根据结果可以验证，机械臂的变形和等效应力在合理的范围内。

从大臂和小臂的瞬态动力学提取的结果中可以看出，小臂与腕部连接处的变形量最大，即在空间中的位移量最大，大臂中间部分的应力最大，这表明在机械臂下料的过程中，大臂两侧金属片靠近工件的外端的部分最薄弱，最先断裂，为以后提高机械臂在下料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。

参考文献

- [1] 王鑫, 赵京. 基于等效臂的遥操作机械臂的运动性能优化方法[J]. 制造技术与机床, 2023(10): 54-60.
- [2] 陈柏金. 快速锻造液压机组[M]. 上海: 机械工业出版社, 2022.
- [3] 漆伟. 基于响应面法的隧道内工程作业机械臂结构优化[J]. 起重运输机械, 2022(20): 28-33.
- [4] 马骥. 基于 ADAMS 的管路安装钻车机械臂运动学仿真研究[J]. 煤矿机械, 2024, 45(12): 55-57.
- [5] 黄利坚, 吴哲, 王宁, 等. 铸铁件打磨工作站上下料机械臂结构设计与仿真分析[J]. 林业机械与木工设备, 2024, 52(9): 61-67.
- [6] 陈振国. 基于 ANSYS 的卧式数控车床自动上下料装置结构设计研究[J]. 自动化应用, 2025, 66(5): 27-29.
- [7] 徐洋洋, 李世豪. 工业机器人机械臂结构拓扑优化设计研究[J]. 中国新技术新产品, 2025(2): 38-40, 47.