

基于伸缩臂型机器人设计的挠度补偿机构的有限元分析

孙博文¹, 郑璐彤²

¹上海理工大学机械工程学院, 上海

²西安欧亚学院文化传媒学院, 陕西 西安

收稿日期: 2024年12月17日; 录用日期: 2025年1月10日; 发布日期: 2025年1月17日

摘要

本文选用伸缩臂型机器人为研究对象, 在Solid Works软件中建立伸缩臂型机器人的三维实体模型, 利用Workbench软件对机器人进行了静力分析。通过静力分析可知工况下机器人伸缩臂的形变量。基于此设计了一款适用于此类机器人的挠度补偿机构, 通过有限元仿真计算工况下补偿机构的疲劳寿命, 以及补偿机构在不同工作状态下对机器人的挠度补偿大小。该研究为适用于伸缩臂型机器人的挠度补偿机构的结构设计提供一种新的参考。

关键词

伸缩臂型机器人, 挠度补偿, ANSYS Workbench

Finite Element Analysis of Deflection Compensation Mechanism Based on Telescopic Boom Type Robot Design

Bowen Sun¹, Lutong Zheng²

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

²School of Culture and Media, Xi'an Eurasia University, Xi'an Shaanxi

Received: Dec. 17th, 2024; accepted: Jan. 10th, 2025; published: Jan. 17th, 2025

Abstract

This article selects the telescopic boom type robot as the research object, establishes a three-dimensional solid model of the telescopic boom type robot in Solid Works software, and performs

文章引用: 孙博文, 郑璐彤. 基于伸缩臂型机器人设计的挠度补偿机构的有限元分析[J]. 建模与仿真, 2025, 14(1): 636-644. DOI: 10.12677/mos.2025.141060

static analysis on the robot using Workbench software. Through static analysis, the deformation of the telescopic boom of the robot under working conditions is determined. Based on this, a deflection compensation mechanism suitable for such robots is designed. The fatigue life of the compensation mechanism under working conditions is calculated through finite element simulation, as well as the deflection compensation magnitude of the compensation mechanism in different working states of the robot. This study provides a new reference for the structural design of deflection compensation mechanisms suitable for telescopic boom type robots.

Keywords

Telescopic Boom Robot, Deflection Compensation, ANSYS Workbench

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

随着物流行业的快速发展,国内工业企业对于搬运机器人的需求较大,但大部分国内和国外的码垛机器人都是基于现有的工业通用机器人而设计的[1]。伸缩臂型机器人作为新型的码垛机器人可以实现原材料、零部件和成品的搬运,目前仓储物流行业是伸缩臂型机器人应用的主要领域之一。在自动化立体仓库中,伸缩臂型机器人可高效地完成货物的存取、搬运和堆垛工作,例如,在电商仓库中,伸缩臂机器人能够快速准确地将货物从货架上取下并搬运到指定地点,满足电商行业高频率的货物出入库需求。但是由于机器人的类似悬臂梁的伸缩臂结构在重物的作用下将产生挠度变形,使得对于运输位置的精准性减小,并且在立体化仓库工况下,由于机器人挠度变形的存在,将需要更大的货位空间便于运输,使得在工作效率以及仓储空间的填充率均较低等问题[2]。

当前,针对伸缩臂型机器人挠度变形的削减策略,主要聚焦于伸缩臂构件的结构优化设计以及高强度材料的替换应用。但对于已有的机器人都是成本较高的解决方法,所以设计一款挠度补偿机构作为可安装于机器人的模块,可以作为一种成本效益更佳且能在多种机器人广泛部署的解决方案。现与挠度补偿相关的设计有很多种,例如采用楔形块的机械补偿机构[3]-[5],液压挠度补偿机构[6],或是采用悬挂方式的补偿机构[7],以及移动式补偿机构[8]但是目前的补偿机构多适用于固定工作平台。对于伸缩臂型机器人此类同时需要横向和纵向移动的工作平台并不适用。

本文以某公司伸缩臂型机器人作为研究对象,通过 Solid Works 软件设计一种采用电动缸作为主要机构的适配机器人的挠度补偿机构,使得机器臂在负载下伸出工作时,最远端因重力产生的下垂变形尺寸减少。并通过有限元仿真计算工况下补偿机构的疲劳寿命,以及在机构不同工作状态下的机器人的挠度补偿大小,并通过补偿数据拟合方程,后续可以便于指导企业通过利用拟合方程以及位移传感器进行实时的挠度补偿控制。

2. 伸缩臂型机器人有限元模型建立及材料选择

根据企业设计的伸缩臂机器人模型,由于伸缩臂机器人结构复杂,为了更准确地得到伸缩臂机器人的有限元分析结果,利用 Solid Works 软件对模型进行简化,将其中的非承重构件例如电机等构件简化,导入到 ANSYS 软件中进行后续的静力学模态仿真分析,模型如图 1 所示。模型的材料选择为 45 钢。

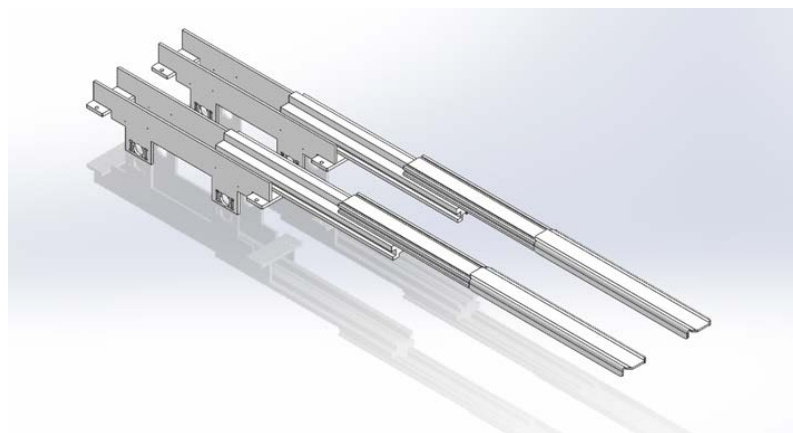


Figure 1. Simplified model diagram of telescopic boom robot
图 1. 简化后的伸缩臂模型图

3. 伸缩臂型机器人的静力学分析

3.1. 静力学分析模型

对于伸缩臂型机器人的静力学分析, 可以将安装挠度补偿机构后的伸缩臂型机器人的静力学分析, 简化为对带悬臂的简支梁的静力学分析, 如图 2 所示, 其中 P 为工况载荷在静力学分析中简化为集中力, A 、 B 分别为挠度补偿机构的安装位置。

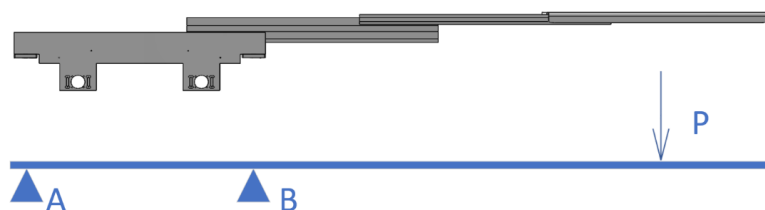


Figure 2. Simplified statics analysis model diagram
图 2. 简化后的静力学分析模型图

3.2. 伸缩臂型机器人工作状态下的静力学分析

根据工况的需要和简化后的模型, 进行载荷模型和位移模型的分析。已知简化后挠度补偿机构安装位置间距 l 为 1300 mm, 伸缩臂机器人的工作行程为 2650 mm, 测量右安装位置距离伸缩机器人的工作平台受集中力处距离为 L , 则 L 最大值为 2030 mm, 且根据企业提供的机器人相关参数和需求得知满载工况为 1000 kg, 伸缩臂机器人自重 810 kg, 且目前无挠度补偿机构的话, 伸缩臂机器人在满载工况下, 满工作行程时最远端产生的挠度为 52 mm。关于简化后机器人模型的力学模型, 由于伸缩臂机器人采用平行叉形结构, 每侧结构的受力状况相同, 所以仅对一侧结构进行分析。

$$F_A + F_B = G + P \quad (1)$$

$$F_A l = PL \quad (2)$$

由公式得到当满载、满行程情况时 P 为 5000 N, L 为 2030 mm, 则计算得到 F_A 为 -5782.5 N, F_B 为 14832.5 N, 即在工作周期中, 挠度补偿机构所受最大压力为 14832.5 N, 最大拉力为 5782.5 N, 可为后续挠度补偿机构的设计提供数据支持。

关于简化后机器人模型的位移模型, 若左侧挠度补偿机构提供伸缩臂左安装位置处纵向位移为 H_A , 右侧为 H_B , 则可以在伸缩臂机器人为刚性的前提下挠度补偿机构可以提供的挠度补偿值为 ΔH 。

$$\Delta H = \frac{H_B - H_A}{l} (L + l) \quad (3)$$

得到当满载、满行程情况下挠度为 52 mm, 则需要两次提供的纵向位移差为 20 mm, 则设计的挠度补偿机构所需要的行程需大于 20 mm。

3.3. 仿真分析结果

对简化后的伸缩臂机器人模型, 在 ANSYS Workbench 软件中采用实体单元进行划分, 划分的网格尺寸大小为 3 cm。经过自动划分后, 生成节点数 100628 个, 单元数为 38596 个的网格实体模型。划分后的网格图如图 3 所示。

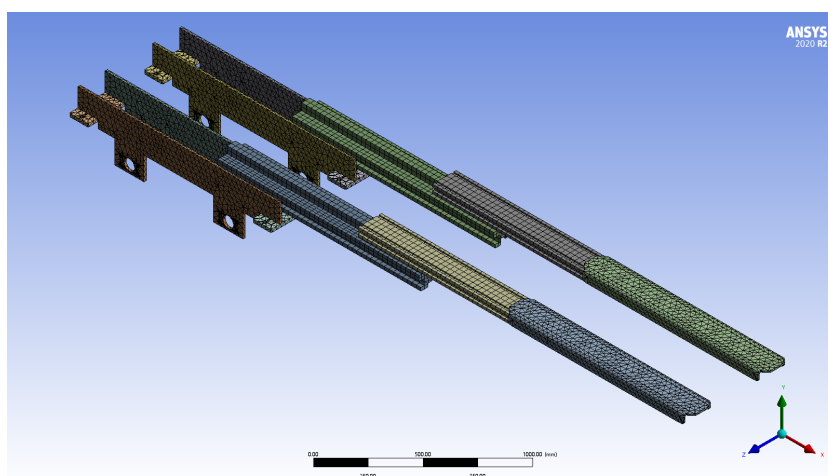


Figure 3. Finite element model of telescopic arm robots

图 3. 伸缩臂型机器人有限元模型图

对模型下端固定支撑, 在两个工作平面上分别施加均布载荷, 载荷大小为满载工况的 5000 N, 并设置重力方向为 y 轴负方向, 求解模型在载荷下的总变形以及 y 轴定向变形, 如图 4、图 5 所示。由结果可知模型在载荷下的形变量约为 24 mm, 与企业的实际工况下不考虑安全系数的变形量基本吻合。

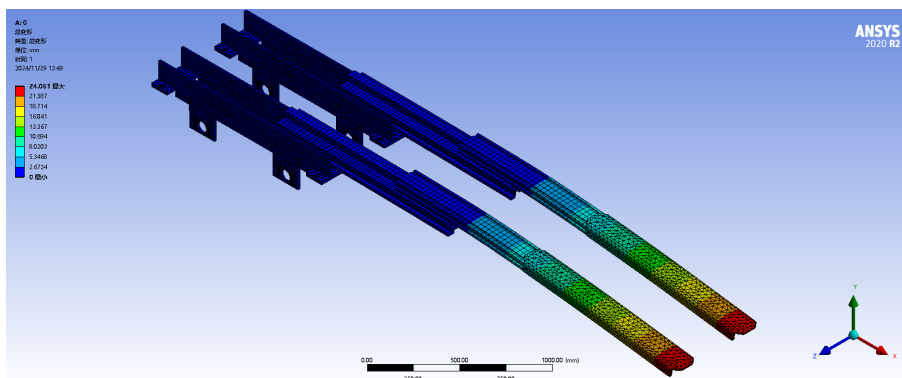


Figure 4. Results of the total deformation of the finite element model

图 4. 有限元模型总变形结果图

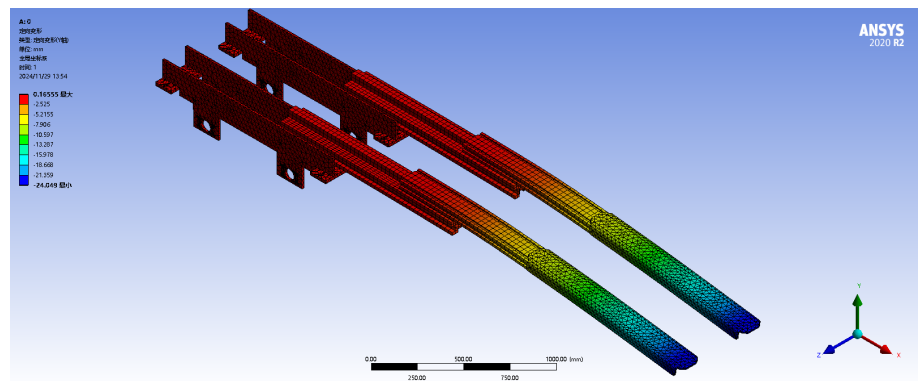


Figure 5. Results of directional deformation along the Y-axis of the finite element model
图 5. 有限元模型 y 轴定向变形结果图

4. 挠度补偿机构设计与分析

4.1. 挠度补偿机构模型的设计

根据上文中得到数据设计基于电动缸的挠度补偿机构模型, 如图 6~8 所示。设计初版尺寸和形状结构如下, 主要由执行部分、传动部分、电机部分三部分构成。执行部分主要依靠行星滚柱丝杠实现运动, 如图 7 所示, 根据工况的需要设计执行部分工作范围即支撑杆的工作范围为 40 mm, 满足力学模型得到的数据且满足实际的工作空间安排, 传动部分主要依靠同步带轮传动。

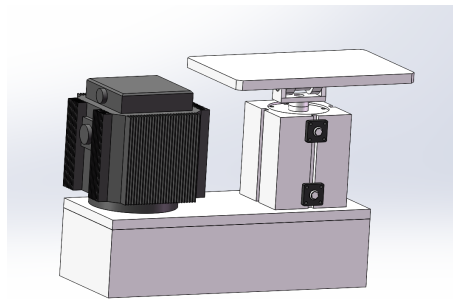


Figure 6. Deflection compensation mechanism model
图 6. 挠度补偿机构模型图

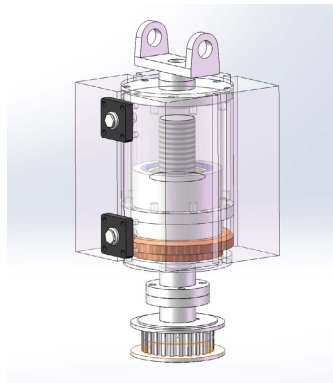


Figure 7. Deflection compensation mechanism actuation model
图 7. 挠度补偿机构执行部分模型图

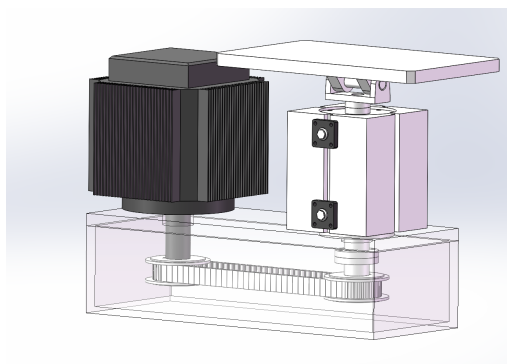


Figure 8. Deflection compensation mechanism transmission model
图 8. 挠度补偿机构传动部分模型图

4.2. 关键结构的有限元分析

4.2.1. 挠度补偿机构疲劳寿命分析

挠度补偿机构执行部分主要的受力结构为丝杠, 可以通过研究丝杠的疲劳寿命来评估挠度补偿机构的使用寿命。研究一侧的挠度补偿机构在伸缩臂型机器人满载情况下的丝杠所受的载荷变化来设计疲劳寿命仿真。在满载情况下由伸缩臂型机器人未伸缩状态到一侧伸展达到最大工作行程, 再回到初始状态到另一侧最大工作行程, 最后回到初始状态, 对于一端挠度补偿机构的所受载荷变化依次约为 6000 N、15000 N、6000 N、-6000 N、6000 N, 由此简化循环载荷谱为 15000 N、6000 N 进行疲劳试验。

按照所选用丝杠产商提供的信息设置丝杠材料属性, 材料为 GCr15, 弹性模量 2.19×10^{11} MPa, 泊松比 0.3, 抗拉强度为 861.3 MPa, 屈服强度 518.42 MPa, 材料密度为 7.8 g/cm^3 。疲劳试验结果为循环载荷谱下疲劳寿命为 8.5031×10^7 次, 疲劳分析结果如图 9 所示, 若两次施加载荷完成一次作业, 及在工件疲劳失效前, 可以完成 4.25155×10^7 次作业, 满足企业需求。

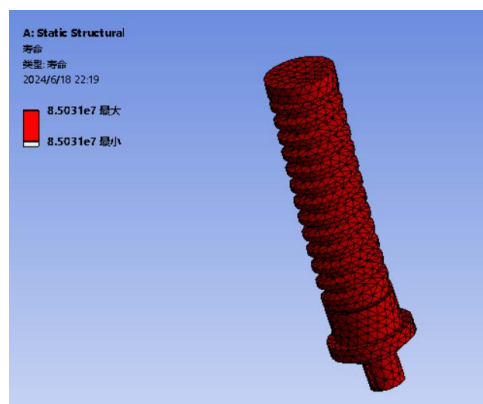


Figure 9. Fatigue analysis results of the lead screw
图 9. 丝杠疲劳分析结果图

4.2.2. 支撑结构受力分析

针对挠度补偿机构执行部分的支撑结构, 参考相关的工程案例, 在执行部分原仅有单个支撑杆支撑情况下, 增加两个辅助支撑杆, 提高执行机构负载能力。通过 ANSYS Workbench 仿真分析, 如图 10 所展示在同条件下, 相较于单支撑杆结构强度提高 37.5% 左右, 应力基本在 234 MPa 之下, 满足材料需求。基于此结果也对挠度补偿结构也进行了相应的结果优化, 如图 11 所示。

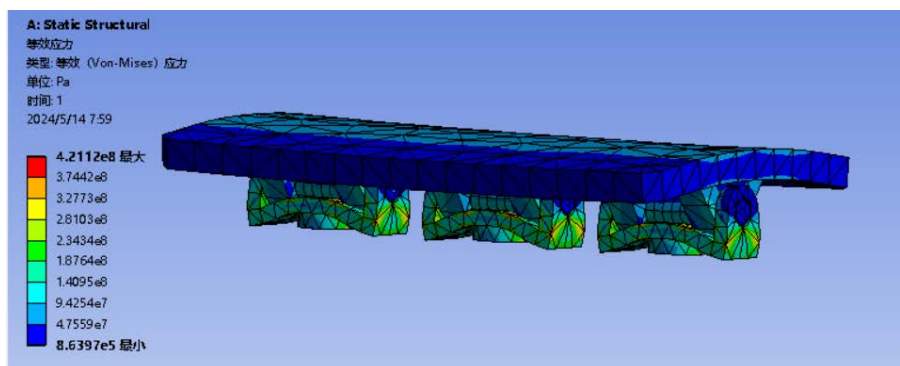


Figure 10. The static analysis results of the support structure

图 10. 支撑结构的静力学分析结果图

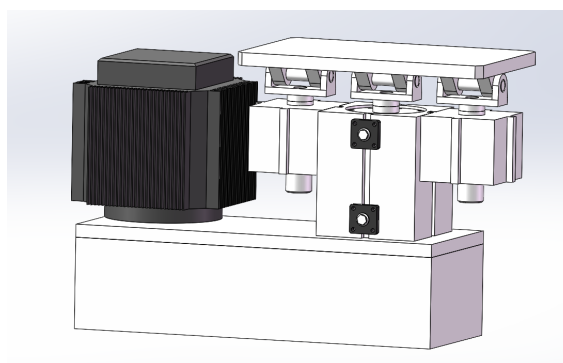


Figure 11. The model of the mechanism after optimization of the support structure

图 11. 支撑结构优化后的挠度补偿机构模型图

4.2.3. 补偿性能有限元分析

根据挠度补偿机构工作原理与伸缩臂型机器人的模型简化有限元模型, 简化挠度补偿机构为在两侧安装位置处具有高度差的刚体元件, 如图 12, 图 13 所示。通过设置刚性元件不同的高度差大小作为为挠度补偿机构值的工作状态, 分别为 0 mm、5 mm、10 mm、15 mm、20 mm、25 mm, 并进行有限元分析查看挠度补偿机构的不同工作状态对于挠度补偿的效果大小。模型底部固定支撑, 在模型工作面上施加工况下的满载作为载荷条件进行有限元分析, 并查看模型总变形结果, 通过测量施加载荷形变后的模型伸缩臂最远端变形后坐标与模型底部纵坐标的差值 S , 以差值大小来评价挠度补偿效果大小, 并测量了在无负载情况及挠度补偿机构工作状态为 0 mm 时, 伸缩臂型机器人的 S 值为 440 mm。

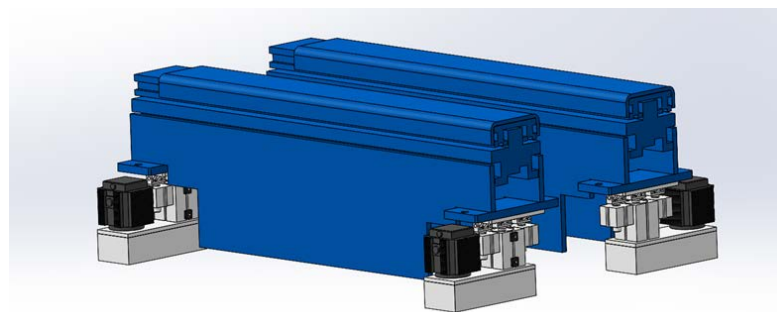


Figure 12. The model of the mechanism after optimization of the support structure

图 12. 支撑结构优化后的挠度补偿机构模型图

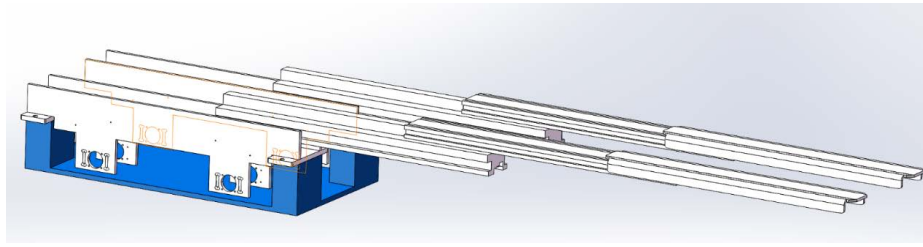


Figure 13. The model of the mechanism after optimization of the support structure
图 13. 支撑结构优化后的挠度补偿机构模型图

通过有限元仿真分析得到每个工作状态下的总变形, 如图 14 所示并测量每次分析的模型底部坐标以及最远端纵坐标结果, 得到在高度差为 0 mm 的条件下, S 值为 268.31 mm, 其与初始值 440 mm 的差值也就是产生了挠度变形大小, 在高度差变化后, 新测量出的 S 值与 268.31 mm 的差值即为挠度补偿效果值。根据表 1 中的补偿机构值与补偿效果值拟合了补偿效果曲线, 如公式 4 所示。并由公式 4 计算当使得 S 值变为 440 mm 时, 需要的挠度补偿机构产生的高度差为 38.2769 mm, 满足对挠度补偿机构的设计要求。

$$f(x) = 0.07252x^2 + 1.802x - 3.536 \quad (4)$$

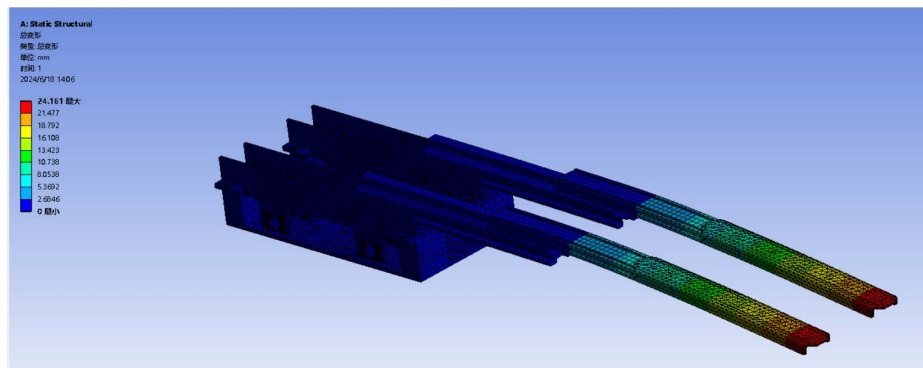


Figure 14. The model of the mechanism after optimization of the support structure
图 14. 支撑结构优化后的挠度补偿机构模型图

Table 1. Data of deflection compensation results

表 1. 挠度补偿结果数据

高度差(mm)	底板纵坐标(mm)	最远端纵坐标(mm)	S 值(mm)	补偿效果值(mm)
0	-214.29	54.02	268.31	0
5	-236.82	36.87	273.69	5.38
10	-90.78	188.16	278.94	10.63
15	-118.41	199.14	317.55	49.24
20	-110.10	224.17	334.27	65.96
25	-141.76	209.02	350.78	82.47

5. 结论

本文以伸缩臂型机器人作为研究对象, 通过静力学分析其工作状态下的挠度变形产生, 建立了相关的力学模型和位移模型, 基于模型得到的数据设计了一款基于电动缸的适用于此类机器人的挠度补偿机

构, 并通过有限元分析得到挠度补偿机构关键部件的疲劳寿命, 得到了在工况下其关键部件可以完成 4.25155×10^7 次作业的仿真结果, 并以关键部件寿命作为机构寿命的参考, 验证了机构寿命可以满足企业的相关需求。后对安装挠度补偿机构的伸缩臂机器人的挠度补偿性能进行了研究, 通过测量在补偿机构不同工作行程下的位移变化结果得到机构的挠度补偿效果大小, 得到了所设计机构可实现的挠度补偿值可达到 82.47 mm, 验证了挠度补偿机构的性能为企业解决了现有问题的同时, 也拟合了补偿效果曲线为企业对于机器人的智能化控制提供有力的支持。后续也会搭建实验平台采集安装挠度补偿机构后实际的补偿数据, 并与理论分析和仿真结果的准确性进行对比验证, 进一步优化其结构设计。

参考文献

- [1] 马亮华. 多级伸缩臂码垛机器人刚柔耦合动力学研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 广州大学, 2021.
- [2] 秦广向. 长臂重载机器人末端轨迹跟踪及控制方法研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 广州大学, 2024.
- [3] 占少伟, 龚俊杰, 韦源源. 基于 ANSYS Workbench 的 100 t 折弯机机械补偿装置的优化[J]. 扬州大学学报(自然科学版), 2023, 26(4): 13-18, 36.
- [4] 黄杉, 夏勇, 诸英范, 等. 双向机械挠度补偿工作台[P]. 中国专利, CN202222285621.1. 2023-01-31.
- [5] 张一帆, 胡有青, 张先进, 等. 一种便于固定工作台的挠度补偿装置[P]. 中国专利, CN202011537496.8. 2022-03-25.
- [6] 赖亚娟. 一种基于压力调节的折弯机挠度补偿量控制装置及其调节方法[P]. 中国专利, CN201910913983.0. 2021-02-02.
- [7] 李立强, 焦建华, 姜辉, 等. 数控单柱移动立式铣车床的横梁平衡装置[P]. 中国专利, CN201110402119.8. 2012-07-11.
- [8] 杨铮钦, 夏福如, 曹根桐, 等. 一种船用卷板机挠度的自动补偿装置[P]. 中国专利, CN201922415523.3. 2020-11-13.