

# 基于SolidWorks Simulation的机械手末端执行器建模及优化设计

温晓研<sup>1\*</sup>, 李锁<sup>1,2#</sup>, 王喆<sup>3</sup>, 李忠峰<sup>4</sup>

<sup>1</sup>沈阳理工大学机械工程学院, 辽宁 沈阳

<sup>2</sup>广州民航职业技术学院民航电信工程学院, 广东 广州

<sup>3</sup>北京中科格励微科技有限公司, 北京

<sup>4</sup>上海博世力士乐液压及自动化有限公司, 上海

收稿日期: 2026年6月6日; 录用日期: 2026年6月30日; 发布日期: 2026年7月7日

## 摘要

针对动力电池顶盖等表面光滑、易受损工件在抓取和搬运过程中易出现划伤、掉落等问题, 本文设计了一种真空吸盘式机械手末端执行器, 并基于SolidWorks Simulation对其进行三维建模、静应力分析、模态分析和轻量化优化设计。首先对初始方案进行有限元分析, 本次分析中, 末端执行器材料选用6061铝合金。在等效工作载荷23.52 N作用下, 初始方案最大应力为5.167 Mpa, 最大位移为0.0286 mm, 安全系数约为10.67, 说明结构具有较大的强度裕量, 存在轻量化优化空间。随后以质量最小为优化目标, 以最大应力不超过27.5 Mpa、最大位移不超过0.1 mm为约束条件, 对安装板厚度、支架厚度和法兰长孔宽度进行参数优化。优化结果表明, 当安装板厚度为6 mm、支架厚度为6 mm、法兰长孔宽度为26 mm时, 末端执行器质量由0.61 kg降低至0.43 kg, 减重0.18 kg, 减重率约为29.5%; 优化后最大应力为9.551 Mpa, 最大位移为0.09077 mm, 均满足设计约束要求。结果表明, 优化后方案在保证结构强度和刚度的前提下实现了明显减重, 可满足动力电池顶盖高速搬运工况下的工程应用要求。

## 关键词

Solidworks Simulation, 机械手末端执行器, 三维建模, 应力分析, 优化设计

# Modeling and Optimal Design of a Robotic Gripper Based on SolidWorks Simulation

Xiaoyan Wen<sup>1\*</sup>, Suo Li<sup>1,2#</sup>, Zhe Wang<sup>3</sup>, Zhongfeng Li<sup>4</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang Liaoning

<sup>2</sup>School of Civil Aviation Electronic Information Engineering, Guangzhou Civil Aviation College, Guangzhou Guangdong

\*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 温晓研, 李锁, 王喆, 李忠峰. 基于 SolidWorks Simulation 的机械手末端执行器建模及优化设计[J]. 建模与仿真, 2026, 15(7): 13-24. DOI: 10.12677/mos.2026.157103

<sup>3</sup>Beijing Zhongke Geliwei Technology Co., Ltd., Beijing<sup>4</sup>Bosch Rexroth Hydraulics and Automation (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai

Received: June 6, 2026; accepted: June 30, 2026; published: July 7, 2026

## Abstract

To address the issues of scratching and dropping of workpieces with smooth and vulnerable surfaces, such as power battery covers, during handling and transfer processes, this paper presents the design of a vacuum suction cup-type robotic end-effector. Utilizing SolidWorks Simulation, the study conducts three-dimensional modeling, static stress analysis, modal analysis, and lightweight optimization design for the end-effector. First, a finite element analysis (FEA) is performed on the initial design scheme. In this analysis, the material selected for the end-effector is 6061 aluminum alloy. Under an equivalent working load of 23.52 N, the initial design exhibits a maximum stress of 5.167 Mpa, a maximum displacement of 0.0286 mm, and a safety factor of approximately 10.68. This indicates that the structure possesses a substantial safety margin and offers potential for lightweight optimization. Subsequently, with the objective of minimizing mass and constraints of maximum stress not exceeding 27.5 Mpa and maximum displacement not exceeding 0.1 mm, parametric optimization is carried out on the thickness of the mounting plate, the thickness of the support bracket, and the width of the elongated hole in the flange. The optimization results show that with a mounting plate thickness of 6 mm, a support bracket thickness of 6 mm, and a flange elongated hole width of 26 mm, the mass of the end-effector is reduced from 0.61 kg to 0.43 kg, achieving a mass reduction of 0.18 kg, corresponding to a reduction rate of approximately 29.5%. The optimized design yields a maximum stress of 9.551 MPa and a maximum displacement of 0.09077 mm, both of which meet the specified design constraints. The results demonstrate that the optimized design achieves significant weight reduction while ensuring structural strength and stiffness, thereby meeting the engineering application requirements for high-speed handling of power battery covers.

## Keywords

SolidWorks Simulation, Robotic End Effector, 3D Modeling, Stress Analysis, Optimal Design

Copyright © 2026 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

真空吸盘式末端执行器是自动化搬运系统中常见的非夹持式抓取装置，尤其适用于表面平整、易损伤的工件。其工作原理是通过真空发生装置在吸盘与工件表面之间形成负压，从而产生吸附力，实现工件的抓取和搬运[1]。与机械夹爪相比，真空吸盘具有接触柔和、结构简单、布置灵活和对工件表面损伤小等优点。已有研究表明，吸盘直径、吸盘数量、吸盘布置方式、真空度以及气路响应速度均会影响抓取稳定性和搬运效率。对于动力电池顶盖这类薄壁、光滑、易划伤工件，多吸盘组合结构能够分散吸附力，提高搬运过程中的稳定性。

并联机器人具有运动速度快、重复定位精度高和动态响应性能好等优点，适合轻小型工件的高速取放和分拣作业。在并联机器人系统中，末端执行器是直接接触工件并完成抓取动作的关键部件，其质量、刚度和安装方式会直接影响机器人末端负载、运动惯量和定位精度。若末端执行器质量过大，会增加机

器人驱动负担,降低高速运动性能;若刚度不足,则可能在加减速过程中产生振动和变形,影响吸盘与工件的接触稳定性。因此,末端执行器设计不仅要满足抓取功能要求,还需要兼顾轻量化和结构可靠性。

有限元仿真方法为末端执行器结构设计提供了有效手段。通过静应力分析,可以获得结构在载荷作用下的最大应力、最大位移和安全系数,从而判断结构是否满足强度和刚度要求;通过模态分析,可以获得结构固有频率和振型特征,用于判断高速运行过程中是否存在共振风险。近年来,SolidWorks Simulation、ANSYS 等软件被广泛应用于机械结构分析和优化设计中,能够在样机制造前发现结构薄弱区域,并通过参数优化或拓扑优化降低结构质量,提高材料利用率。

现有研究多集中于通用真空吸盘夹具、气动机械手应用或机器人整体结构分析,而针对动力电池顶盖高速摆盘场景的多工位真空吸盘末端执行器研究相对较少。特别是在高速并联机器人应用中,末端执行器不仅要保证可靠吸附和无损搬运,还要尽可能降低自身质量,以减小机器人末端负载和运动惯量。因此,有必要结合具体工况,对末端执行器进行三维建模、载荷计算、静力学分析、模态分析和轻量化优化设计。

基于上述研究背景,本文设计了一种用于动力电池顶盖摆盘作业的横梁式多工位真空吸盘末端执行器。利用 SolidWorks 建立三维模型,并通过 SolidWorks Simulation 对其进行有限元分析;在验证初始结构强度、刚度和动态稳定性的基础上,以质量最小为优化目标,对关键结构参数进行优化设计,并对优化前后结构性能进行对比分析,为动力电池顶盖高速、稳定、无损搬运提供设计依据。

## 2. SolidWorks Simulation 的应力分析功能

SolidWorks Simulation 的应力分析功能主要用于在产品阶段预测零件或装配体在受力后的结构表现,帮助工程师判断设计是否安全、是否需要优化。它基于有限元分析方法,将模型划分为大量小单元,通过计算载荷、约束、材料属性之间的关系,得到应力、应变、位移和安全系数等结果。用户可以在 SolidWorks 建模环境中直接设置材料、固定面、外力、压力、扭矩、重力等条件,不需要频繁切换软件,操作比较直观。

在静态应力分析中,软件可以显示零件在受力后的最大应力位置、变形趋势以及可能发生失效的危险区域。常用的结果包括应力云图、位移云图、应变云图和安全系数分布图。通过这些图形,设计人员可以快速判断结构薄弱处,例如孔边、尖角、支撑部位或载荷集中区域。如果最大应力超过材料屈服强度,说明结构可能发生塑性变形,需要增加厚度、改变结构形状、优化圆角或更换材料。

## 3. 机械手末端执行器三维建模

### 3.1. 机械手总体结构

根据电池顶盖高速摆盘作业的需求,采用“并联机器人真空吸盘式末端执行器”的总体方案。并联机器人具有运动速度快、重复定位精度高、动态响应性能好等特点,适用于轻小型工件的高速取放和分拣作业。真空吸盘式末端执行器安装在并联机器人动平台下方,用于完成电池顶盖的吸附、搬运和释放。真空吸附夹除了具备可靠稳定吸附工件外,还不易对工件表面造成损坏[2]。

用 Solidworks 电池顶盖摆盘机械手总体结构如图 1 所示。该结构主要由机械手框架、连接板、阀板机构、并联机器人本体和机械手末端执行器组成。机械手框架采用门式支撑形式,左右两侧立柱与上部横梁共同构成稳定的承载基础,用于安装并联机器人及相关控制、气动元件。连接板布置在框架上方,是机器人本体与机架之间的重要过渡部件,起到定位、连接和传递载荷的作用。并联机器人安装在框架内部,通过多组轻质连杆驱动末端平台实现高速空间运动,具有响应快、运动惯量小、定位精度高等特点。阀板机构一般用于集中安装真空阀、气路接头和控制元件,可缩短气路长度,提高真空响应速度。机械手末端执行器安装在并联机器人下端,是直接接触工件的执行部件,能够根据工艺要求完成吸取、搬运和放置动作。

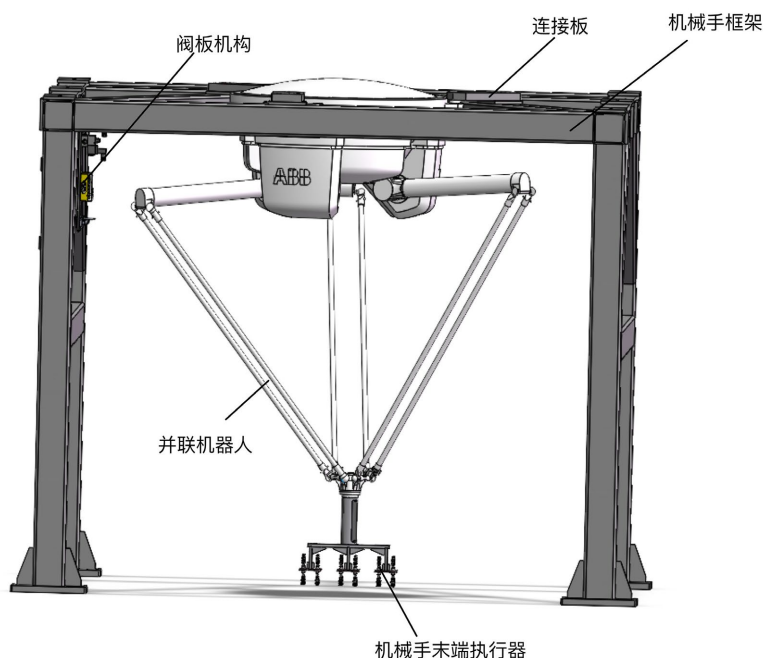


Figure 1. Overall structure of the robotic arm  
图 1. 机械手总体结构

### 3.2. 机械手末端执行器具体结构

手部装置作为冲压机械手的终端，主要用来实现对码垛产品的抓取、握紧或夹持，它直接影响着机械手的性能[3]。根据一次同时吸取 3 个顶盖的工艺要求，本文设计的末端执行器采用横梁式多工位结构，三个吸附单元沿横向布置，每个吸附单元对应一个电池顶盖。具体结构如图 2 所示。该结构主要由转接法兰、连接板、手抓支架、手抓安装板、吸盘连接板和真空吸盘等部分组成。

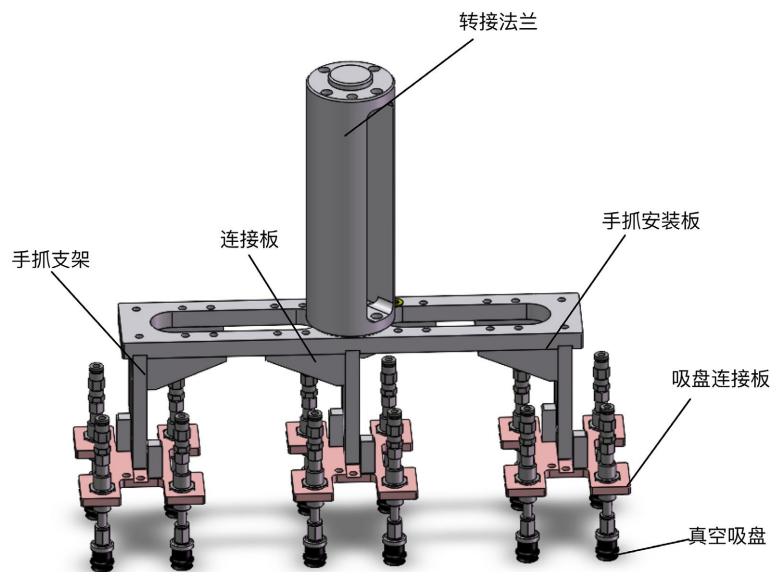


Figure 2. Specific structure of robotic arm end effectors  
图 2. 机械手末端执行器具体结构

### 3.3. 工艺流程

机器人带动末端执行器移动到电池顶盖上方，真空吸盘下降并与顶盖表面接触，随后真空系统启动形成负压，吸盘将顶盖牢固吸附；机器人再带动末端执行器移动至吸塑盘或指定摆放位置，到位后解除真空，电池顶盖被释放并准确放置。整体机构结构简单、质量较轻、响应速度快，满足电池顶盖高速、无损、精准摆盘的使用要求。工艺流程图如图 3 所示。

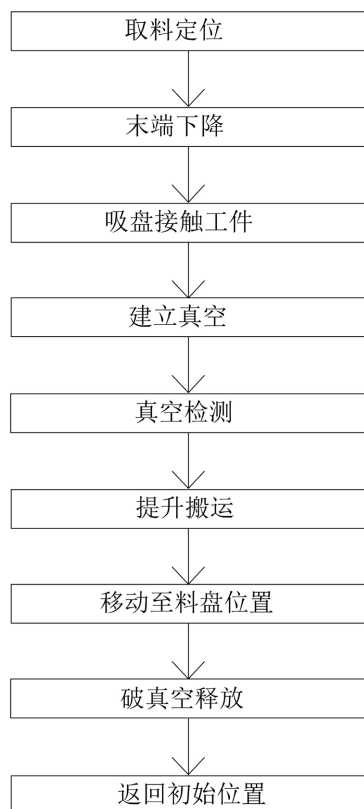


Figure 3. Process flowchart  
图 3. 工艺流程图

## 4. 机械手末端执行器优化设计

优化设计对象为电池顶盖摆盘机械手末端执行器的主要承载结构。该末端执行器在工作过程中需要随机器人完成快速抓取、搬运和放置动作，因此其结构必须同时满足强度、刚度、动态稳定性以及轻量化要求。为验证结构设计的合理性，采用 SolidWorks Simulation 对末端执行器进行了静应力分析、模态分析和优化设计。

### 4.1. 载荷计算说明

在进行有限元分析前，需要确定末端执行器在实际搬运工况下所承受的等效载荷。末端执行器在工作过程中随并联机器人完成快速取放运动，其受力主要包括电池顶盖、真空吸盘、吸盘连接件、气管和接头等附加部件产生的重力，以及机器人加速或减速运动时产生的惯性力。由于本文主要研究末端执行器主体承载结构的强度、刚度和轻量化设计，因此将附加部件对主体结构的作用等效为静力载荷进行分析。抓手结构各部件参数如表 1。

**Table 1.** Parameters of each component of the gripper structure  
**表 1.** 抓手结构各部件参数

参数名称	符号	数值
单个顶盖质量	m1	0.1 kg
一次吸取数量	-	3 个
一次吸取总质量		0.3 kg
重力加速度	g	10 m/s <sup>2</sup>
最大加速度	a	10 m/s <sup>2</sup>
抓手本体质量	m2	0.61 kg
单个吸盘质量	m3	0.03 kg
吸盘总数		12 个
吸盘总质量		0.36 kg
吸盘连接件	m4	0.04 kg
吸盘连接件个数		3
吸盘连接件总质量		0.12 kg
气管与接头质量	m5	0.2 kg
动力载荷系数	Kd	1.2

除末端执行器分析主体外，附加部件质量包括一次吸取的电池顶盖质量、吸盘质量、吸盘连接件质量以及气管和接头质量，其总质量为： $m = 0.3 + 0.12 + 0.36 + 0.2 = 0.98 \text{ kg}$ 。

根据达朗贝尔原理，附加质量在加速运动时产生的惯性力为： $F_a = ma$ 。

附加质量所受重力为： $F_g = mg$ 。

当末端执行器向上加速或向下减速时，重力和惯性力方向相同，此时为竖直方向的最不利工况。因此，附加质量作用在末端执行器主体上的等效载荷为： $F_0 = m(g + a)$ 。

考虑到机器人高速取放过程中还可能存在着加速度波动、轨迹切换冲击、真空吸附和释放过程中的气动扰动、附加部件质量误差以及模型简化误差等因素，在静力学等效分析中引入动载放大系数  $K_d$ ，则等效载荷为： $F = K_d \cdot m(g + a)$  式中， $K_d$  为动载放大系数。

本文中机器人运行采用平稳启停控制，末端执行器与工件之间为真空吸盘柔性接触，不存在明显刚性碰撞；同时，最大加速度  $a = 10 \text{ m/s}^2$  已按设备高速运行工况取值，惯性载荷已在加速条件下考虑。因此，本文取  $K_d = 1.2$ ，即在重力和最大加速度惯性力基础上增加 20% 的载荷裕量，用于考虑气动冲击、加速度波动等不确定因素。

则等效载荷为： $F = 1.2 \times 0.98 \times (10 + 10) = 23.52 \text{ N}$ 。

该载荷用于模拟末端执行器在高速搬运电池顶盖、吸盘和气动附件时受到的较不利竖直等效载荷，为后续静应力分析和结构优化提供载荷依据。

## 4.2. 静应力分析

静应力分析的主要目的是验证末端执行器在工作载荷作用下是否满足强度和刚度要求。由于末端执行器在正常工作时材料变形较小，且不会进入塑性变形阶段，因此本次分析属于线弹性静力学分析。

### 4.2.1. 网格设置

为了保证有限元分析结果的准确性，对末端执行器模型的单元类型、网格质量、求解器以及网格无

关性进行了设置和验证。末端执行器结构包含安装孔、长圆孔、连接板、支架以及多处圆角过渡区域，几何形状相对复杂。若采用六面体单元进行自动划分，容易在孔边、薄壁和几何突变位置产生畸变单元。因此，本文采用 SolidWorks Simulation 中的高质量二阶四面体实体单元进行网格划分。该单元为 10 节点四面体单元，相比一阶四面体单元能够更准确地描述曲面边界和弯曲变形，适用于带有孔、圆角和复杂连接结构的实体模型。

网格划分采用基于曲率的混合网格方法。该方法能够根据模型曲率变化自动调整单元尺寸，在孔边、长圆孔、圆角过渡和支架连接区域进行局部加密，而在平直区域适当放大单元尺寸，从而兼顾计算精度和计算效率。经多次试算后，最终选取最大单元尺寸为 4 mm 的网格方案，生成单元数量为 80,220 个，节点数量为 136,584 个。网格划分模型如图 4。

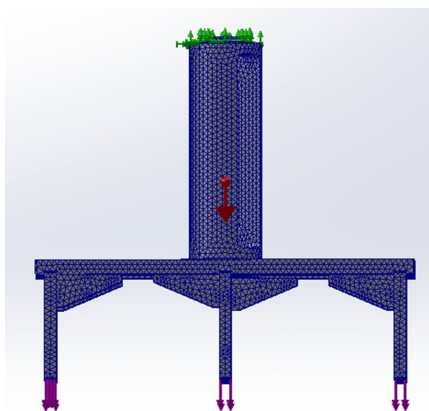


Figure 4. Mesh division model

图 4. 网格划分模型

为评价网格质量，主要考察单元高宽比和畸变单元比例。一般情况下，四面体单元高宽比应控制在 10 以下，关键区域应尽量控制在 3 以下。本次网格划分结果显示，网格最大高宽比为 7.4622，小于 10；高宽比小于 3 的单元占 95.6%；高宽比大于 10 的单元占比为 0%。说明网格整体质量较好，不存在严重畸变单元，能够满足静力分析和模态分析的计算要求。本次静力分析属于线弹性小变形问题，材料假设为均匀、连续、各向同性。求解过程中采用 SolidWorks Simulation 中的 Direct Sparse 直接稀疏矩阵求解器。该求解器适用于中等规模实体单元模型，具有较好的数值稳定性和计算精度。模态分析提取前 6 阶固有频率，材料、约束条件和网格设置与静力分析保持一致，以保证分析模型的一致性。

Table 2. Mesh model comparison

表 2. 网格模型对比

最大单元尺寸/mm	单元数量	节点数量	最大应力/Mpa	最大变形/mm	最大应力相对误差%	最大变形相对误差/%
3	146,078	235,723	5.086	0.02876	0	0
4	80,220	136,584	5.167	0.02860	1.59	0.56
5	76,383	134,450	5.171	0.02899	1.67	0.80
6	71,506	122,407	5.226	0.02855	2.75	0.73

为了验证网格尺寸对计算结果的影响，进一步进行了网格无关性验证。分别选取最大单元尺寸为 6 mm、5 mm、4 mm 和 3 mm 的四组网格模型，在相同材料、约束和载荷条件下进行计算，并比较最大应

力变化情况。网格模型对比结果如表 2 所示。

由表 2 可知,随着网格尺寸逐渐减小,最大等效应力变化幅度较小,计算结果整体趋于稳定。以 3 mm 网格作为参考,4 mm 网格下的最大应力为 5.167 Mpa,最大应力相对误差为 1.59%,最大变形相对误差为 0.56%,均小于 5%。因此,可以认为当最大单元尺寸为 4 mm 时,有限元计算结果已经基本达到网格无关。3 mm 网格的单元数量和节点数量明显增加,计算成本较高,而 4 mm 网格能够在保证计算精度的同时兼顾计算效率,因此本文最终选用最大单元尺寸为 4 mm 的网格进行后续静力分析和模态分析。

#### 4.2.2. 材料设置

本次分析中,末端执行器材料选用 6061 铝合金,6061 铝合金具有密度低、强度较高、加工性能好等特点,适合用于机器人末端执行器等对轻量化有要求的结构件。在软件中,该材料的屈服强度为 55.15 MPa,该数值作为判断结构是否发生屈服失效的重要依据。6061 铝合金具体参数如表 3。

Table 3. Key parameters for aluminum alloy

表 3. 6061 铝合金具体参数

属性	数值	单位
弹性模量	69000.00358	N/mm <sup>2</sup>
泊松比	0.33	-
抗剪模量	25999.99898	N/mm <sup>2</sup>
质量密度	2700	Kg/m <sup>3</sup>
张力强度	124.084	Mpa
屈服强度	55.15	Mpa

#### 4.2.3. 分析结果

末端执行器在工作载荷作用下最大应力为 5.167 Mpa,小于 6061 铝合金材料的屈服强度 55.15 Mpa。因此,该结构在当前载荷条件下不会发生屈服破坏,满足强度要求。安全系数约为 10.67,说明结构具有较大的强度裕量。应力较大的区域一般集中在安装孔、连接板过渡位置、支架连接处等几何突变区域,这些区域容易产生局部应力集中。但由于最大应力数值较低,因此不会影响整体结构安全。最大位移为 0.0286 mm,整体变形较小,说明结构具有较高刚度,能够满足吸盘抓取和电池顶盖摆放过程中的定位要求。最大应变为 0.00004161,小于材料屈服极限应变,说明结构处于弹性变形范围内,工作载荷卸除后能够恢复原状。静应力分析图如图 5。

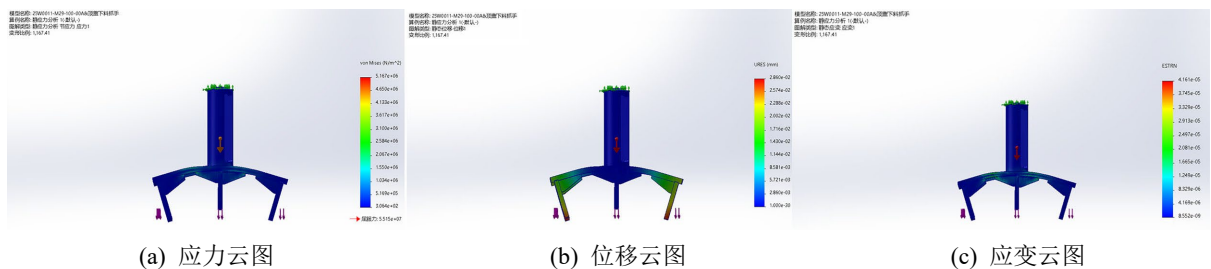


Figure 5. Static stress analysis plot

图 5. 静应力分析图

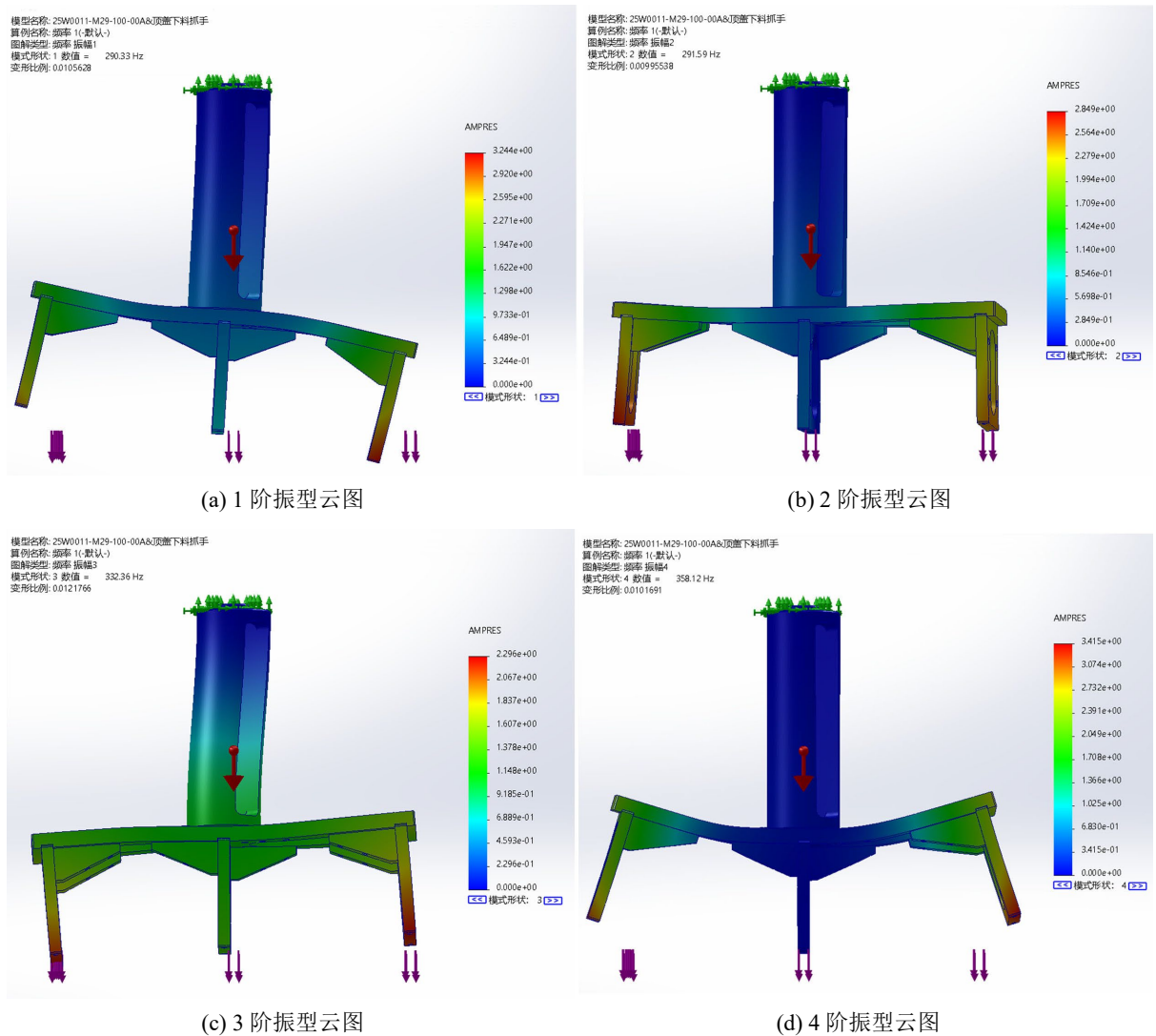
#### 4.3. 模态分析

模态分析的目的是获得末端执行器的固有频率和振型,判断结构在工作过程中是否可能发生共振。

机器人在运行过程中会受到电机转速、运动节拍、加减速冲击、吸盘吸附释放等激励影响。如果外部激励频率接近结构固有频率，就可能引起共振[4]，导致末端执行器振动加剧，影响抓取精度和使用寿命。本次模态分析提取前6阶固有频率，各阶固有频率与振型特征如表4。1~6阶振型图如图6。

**Table 4.** Natural frequencies and mode shapes for different orders  
**表 4.** 各阶固有频率与振型特征

阶次	固有频率/Hz	振型特征	对实际运行的可能影响
1	290.33	整体低阶弯曲振动	影响末端整体定位精度和吸盘接触稳定性
2	291.59	另一方向的整体弯曲或轻微扭转振动	引起吸盘组受力不均，影响顶盖吸附
3	332.36	弯曲与扭转耦合振动	与二阶模态耦合，导致末端波动
4	358.12	局部连接板、支架及安装区域振动	影响局部连接可靠性
5	539.23	局部支架、安装板及吸盘连接区域振动	引起气管、接头等附属件局部振动
6	809.93	高频局部振动	对整体运动影响较小



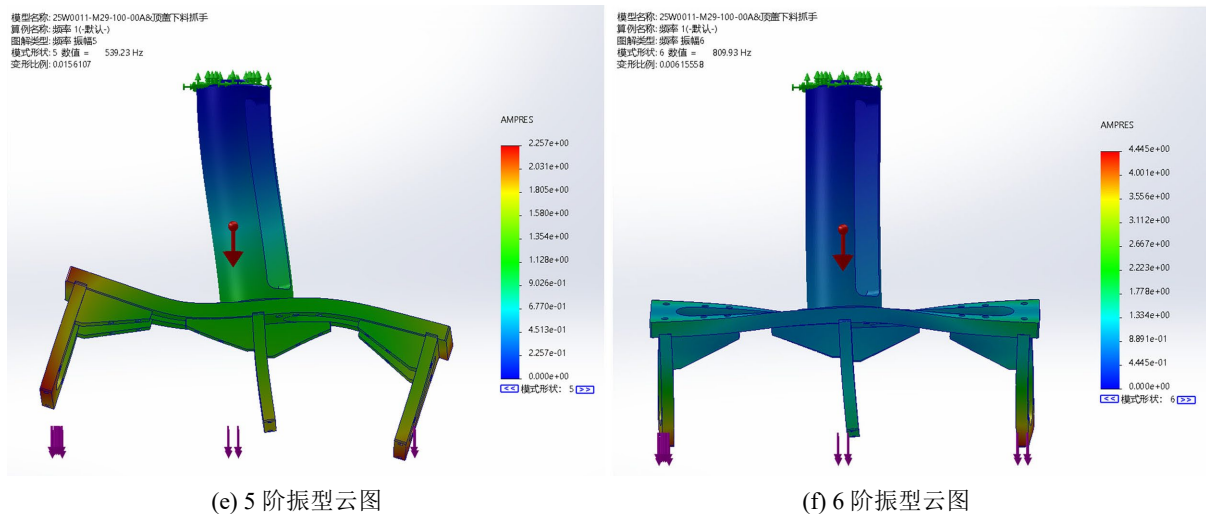


Figure 6. 1~6 Mode shape plot  
图 6. 1~6 阶振型云图

一阶固有频率为 290.33 Hz。该频率为结构最低固有频率，是判断末端执行器是否容易发生共振的重要指标。由于机器人在正常取放、加减速以及吸盘吸附释放过程中的主要激励频率通常较低，远小于该结构的一阶固有频率，因此末端执行器的最低固有频率与工作激励频率之间具有较大差距，结构在正常工作条件下不易发生共振，具有较好的动态稳定性。

第二阶固有频率为 291.59 Hz，与第一阶固有频率较为接近，说明结构在两个相近频率范围内可能存在不同方向的整体弯曲振动或局部扭转振动。该类振型可能导致末端执行器在高速运动过程中产生轻微姿态偏转，使吸盘组之间发生相对位移。如果机器人在高速加减速或轨迹切换过程中产生较强横向冲击，可能会造成吸盘组受力不均，从而影响电池顶盖的吸附稳定性和平稳搬运效果。

第三阶固有频率为 332.36 Hz，其振型主要表现为另一方向的弯曲或弯曲与扭转耦合振动。该阶频率高于前两阶频率，仍明显高于机器人正常取放运动的主要激励频率。因此，在一般工作状态下，第三阶振型被激发并产生明显共振的可能性较小。但由于该振型可能引起末端局部区域的姿态变化，仍需在设计中关注吸盘安装区域和连接支架处的刚度。

第四阶固有频率为 358.12 Hz，主要表现为局部连接板、支架或安装区域的振动。该频段已经明显高于机器人运行过程中的低频激励范围，因此发生整体共振的可能性较小。但对于局部薄壁结构、连接板、螺栓连接处以及吸盘支架等部位，仍需要注意长期振动可能造成的连接松动或局部疲劳问题。

第五阶固有频率为 539.23 Hz，属于较高频局部振动，主要可能出现在支架、安装板或吸盘连接区域。由于该频率远高于正常搬运过程中的主要激励频率，一般不易被机器人低频周期运动激发。但在存在气动冲击、吸盘快速吸附释放、电磁振动或局部碰撞冲击时，仍应避免外部激励频率接近该频段，以防止局部振动放大。

第六阶固有频率为 809.93 Hz，属于高频局部振动。该阶振型通常对末端执行器整体运动稳定性的影响较小，一般不会被机器人正常取放运动激励。但若系统中存在高频气动脉动、局部冲击或附属部件振动，仍可能对气管、接头、吸盘连接件等局部结构产生一定影响，因此在实际装配和使用过程中应保证连接可靠，避免附属件松动。

#### 4.4. 优化设计

在静应力分析和模态分析结果满足要求的基础上，为进一步减小末端执行器质量、降低机器人末端

负载、提高运动响应速度，对结构进行了轻量化优化设计。优化设计的基本原则是在保证强度和刚度满足要求的前提下，使结构质量尽可能小[5]。

#### 4.4.1. 优化约束条件

对该组件进行优化设计。要保证该组件的最大应力 27.5 Mpa (保证至少 2 倍的安全系数)。保证该组件的最大变形量为 0.1 mm。添加 3 个变量：法兰的长孔宽度、安装板的厚度、支架厚度，如表 5。这三个参数直接影响末端执行器的材料用量、承载能力和整体刚度。通过调整这些尺寸，可以在保证安装功能和结构强度的前提下，减少冗余材料，实现轻量化。设置约束的最大应力为 27.5 Mpa，设置约束的最大位移(变形量)小于 0.1 mm，将质量最小确定为优化目标。

Table 5. Parameter changes

表 5. 设置变更参数

参数	最小/mm	最大/mm	步长/mm
法兰长孔宽度	22	26	2
安装板厚度	6	10	2
支架厚度	6	8	1

#### 4.4.2. 分析结果

优化设计共得到 27 种参数组合方案。通过比较各方案的质量、最大应力和最大位移，最终选取安装板厚度为 6 mm、支架厚度为 6 mm、法兰长孔宽度为 26 mm 的方案作为优化后最终设计方案。该方案质量为 0.43 kg，相比优化前初始方案的 0.61 kg 减少了 0.18 kg，减重率约为 29.5%。优化后最大应力为 9.551 MPa，小于优化约束值 27.5 MPa；最大位移为 0.09077 mm，小于优化约束值 0.1 mm。优化后结构安全系数约为 5.77，仍满足强度要求。优化性能对比如表 6 所示。

Table 6. Structural performance comparison

表 6. 优化结构性能对比

项目	优化前	优化后	变化情况
质量/kg	0.61	0.43	减少 0.18 kg
减重率/%	-	29.5	明显减重
最大应力/MPa	5.167	9.551	增加 85%，但小于 27.5 Mpa
最大位移/mm	0.02860	0.09077	增加，但小于 0.1 mm
安全系数	10.67	5.77	仍满足强度要求

#### 4.4.3. 优化对比

优化后结构质量明显降低。虽然优化后最大应力和最大位移均有所增加，但二者均未超过设计约束值。最大应力 9.551 Mpa 仅为允许应力 27.5 MPa 的 34.7%，最大位移 0.09077 mm 为允许位移 0.1 mm 的 90.77%。因此，优化后方案在保证结构安全和刚度要求的前提下，充分利用了材料性能，达到了轻量化设计目的。对于并联机器人高速搬运工况，末端执行器质量的降低能够减小机器人末端负载和运动惯量，有利于提高系统加减速响应能力和定位稳定性。因此，优化后方案相比初始方案具有更好的工程应用价值。

## 5. 结论

静应力分析结果表明，在等效工作载荷 23.52 N 作用下，优化前初始方案最大应力为 5.167 MPa，最

大位移为 0.02860 mm，最大应变为 0.00004161。最大应力远小于 6061 铝合金屈服强度 55.15 MPa，安全系数约为 10.67，说明初始结构满足强度和刚度要求。但初始方案安全系数较高，表明结构存在一定材料冗余，具有进一步轻量化优化的空间。

模态分析结果表明，末端执行器前 6 阶固有频率为 290.33 Hz 至 809.93 Hz，其中一阶固有频率为 290.33 Hz。该频率高于机器人正常取放运动的主要低频激励范围，说明结构在正常工作条件下发生共振的可能性较小，具有较好的动态稳定性。

以质量最小为优化目标，以最大应力不超过 27.5 MPa、最大位移不超过 0.1 mm 为约束条件，对安装板厚度、支架厚度和法兰长孔宽度进行参数优化。优化结果表明，当安装板厚度为 6 mm、支架厚度为 6 mm、法兰长孔宽度为 26 mm 时，末端执行器质量由 0.61 kg 降低至 0.43 kg，减重 0.18 kg，减重率约为 29.5%。

对优化后最终方案，结果表明优化后最大应力为 9.551 MPa，小于允许应力 27.5 MPa；最大位移为 0.09077 mm，小于允许位移 0.1 mm；安全系数约为 5.77。与优化前相比，优化后最大应力和最大位移有所增加，但仍处于设计允许范围内，说明优化方案在满足强度和刚度约束的基础上有效降低了结构质量。

综上所述，优化后末端执行器在保证结构安全性和刚度要求的前提下实现了明显减重，有利于降低机器人末端负载和运动惯量，提高机械手运动响应速度和定位精度。该优化方案可为后续样机制造和实验验证提供设计依据。

## 参考文献

- [1] 张会桥. 气动机械手在自动化冲压生产线设计中的应用[J]. 科技传播, 2016, 8(14): 176+211.
- [2] 李鹏, 赵维贤, 宁超, 康万山. 真空技术在设备自动化中的应用[J]. 山东工业技术, 2016(19): 284.
- [3] 谢波, 熊立贵, 吴文君, 陈尚升, 周晨铨, 涂志刚. 码垛机械手吸附式手部装置的方案设计与分析[J]. 塑料包装, 2023, 33(3): 47-52.
- [4] 肖婷婷, 王李波, 张旭中, 斜奕轶, 赵川川. 基于 ANSYS 的主梁加工设备有限元分析[J]. 装备制造技术, 2021(11): 50-52.
- [5] 曹志民. 四自由度码垛机器人设计、承载能力分析与优化研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉科技大学, 2015.