

# 滚动轴承包装筒抓取机械手的设计与控制策略

doi:10.20269/j.cnki.1674-7100.2026.2008

李迎春 赵 衡  
姚齐水

湖南工业大学  
机械工程学院  
湖南 株洲 412007

**摘 要:**为实现滚动轴承包装筒自动化抓取,解决中小企业人工包装效率低、成本高、易损坏等问题,设计了一种滚动轴承包装筒抓取机械手及其控制策略。此机械手由法兰连接块、转接座、夹爪气缸、V型手指等部件共同协同运作。其中,V型手指采用自适应结构,可匹配外径35~55 mm的包装筒;经由夹持力计算,选定HFKL25气缸,搭配DMS系列传感器和华数HSR-SR10-800型4轴机械臂;与此同时,基于西门子S7-1200 PLC构建控制流程。仿真结果表明,该机械手在抓取-搬运-复位全流程中运动平稳,3向位移协同性良好;在0~120 Hz频率范围内频响低且稳定,具备良好的动态载荷适应性与抗震性。该机械手在满足自动化包装对精度和稳定性需求的同时,可助力企业优化流程、降本增效。

**关键词:**滚动轴承;包装筒;抓取机械手;V型手指;PLC控制

**中图分类号:** TP241; TB486

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1674-7100(2026)02-0057-08

**引文格式:** 李迎春,赵 衡,姚齐水.滚动轴承包装筒抓取机械手的设计与控制策略[J].包装学报,2026,18(2):57-64.

在制造业蓬勃发展中,轴承作为机械装备核心基础零部件,尤其在新能源汽车、风电及高端装备中的需求呈爆发式增长。当前,制造业多数核心生产环节已实现自动化升级,但在滚动轴承包装工序中,众多中小型企业仍依赖人工装箱<sup>[1]</sup>。传统人工操作的弊端凸显:劳动强度大、作业节拍慢,难以匹配前端自动化生产节奏,直接制约产能释放;高人力成本加重企业运营负担;人工抓取过程中易因操作不当导致轴承损伤,严重影响产品质量与生产良品率;人工操作的随机性易引发漏装、错装等问题,降低包装的一致性与可靠性,进而削弱了企业市场竞争力<sup>[2]</sup>。与此同时,现有商用轴承包装机普遍存在柔性化不足、抓取精度不高的问题,难以适应中小型企业多品种、

小批量的柔性化生产需求。为突破上述瓶颈,推动轴承包装工序自动化升级,本研究聚焦塑料筒包装滚动轴承的抓取机械手设计与控制策略,研发适配自动包装线的高效、精准抓取设备<sup>[3]</sup>,旨在助力中小企业优化包装流程、降本增效,推动轴承制造全流程自动化体系的完善,同时为低成本自动化技术在细分制造场景中的应用探索可行路径。

## 1 抓取机械手结构设计

### 1.1 整体结构设计

针对滚动轴承包装高节拍、多品种的柔性化和高精度需求,本文设计了滚动轴承包装筒抓取机械手,其结构如图1所示。该抓取机械手由法兰连接块、

收稿日期:2025-04-24

作者简介:李迎春,男,硕士生,主要研究方向为运载装备、关键件设计理论及应用,E-mail:513760492@qq.com

通信作者:姚齐水,男,教授,博士,主要从事运载装备、关键件设计理论及应用研究,E-mail:yaoqishui@126.com

转接座、夹爪气缸、V 型手指等部件构成。其中，法兰连接块沿周向和轴向设有 T 型凹槽。螺栓拧紧时，凹槽允许法兰连接块产生收缩变形，使其抱紧机械臂主轴，实现运动与动力的精准传递。转接座是法兰连接块与夹爪气缸之间的转接器。一般法兰连接块已标准化，而气缸接口各异，因此转接座实现了模块化与定制化的兼顾。夹爪气缸是抓取动作的动力源，将气压转为直线推力，推动 V 型手指开合。推力大小决定夹紧力，伸缩速度决定作业节拍。V 型手指作为末端抓取执行部件，其 V 型夹持面与包装筒外轮廓需适配，依托夹爪气缸提供的稳定夹持力，实现对包装筒的可靠抓取。

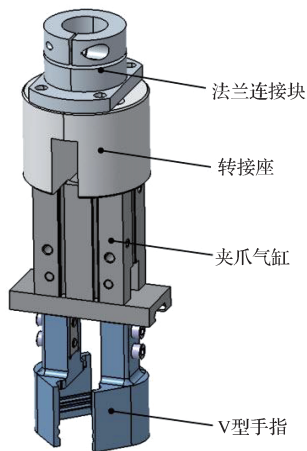


图 1 滚动轴承包装筒抓取机械手结构

Fig. 1 Structure of gripping manipulator for rolling bearing packaging tubes

为保障机械手结构的轻量化、强度及动态性能，各部件材料经协同优化设计。关键部件的材料选型如表 1 所示。其中，铝合金 6061-T6 占比 80%，以满足轻量化与抗振需求；不锈钢螺栓（A2-70 级）则提供高强连接保障。

表 1 关键部件的材料选型

Table 1 Material selection for key components

部 件	材 料
法兰连接块	铝合金 6061-T6
转接座	铝合金 6061-T6
夹爪气缸壳体	铝合金 6061-T6
夹爪气缸卡爪	轴承钢
V 型手指	铝合金 6061-T6

## 1.2 关键部件设计

### 1.2.1 自适应 V 型手指结构设计

V 型手指为滚动轴承包装筒抓取机械手的核心部件，目前行业内主要为卡板或半圆形结构，但均存在

明显局限：卡板结构虽然灵活度较高，依托气缸行程来抓取不同尺寸规格的包装筒，但其仅通过一对摩擦面提供承载力，抓取载荷受限，且抓取时无法自适应调心，易造成抓取定位不佳，进而影响后续装箱；半圆形结构虽然具备抓取精度高、承载能力强的优势，但仅能抓取与自身圆弧相匹配的包装筒，柔性适配性不足，难以适应多种尺寸规格的包装筒。为突破上述局限，通过优化 V 型手指的夹持夹角角度（即两指接触包装筒时形成的开口角度）与沟槽尺寸，实现对外径 35~55 mm 不同规格轴承包装筒的抓取。自适应 V 型手指的结构简图如图 2 所示。

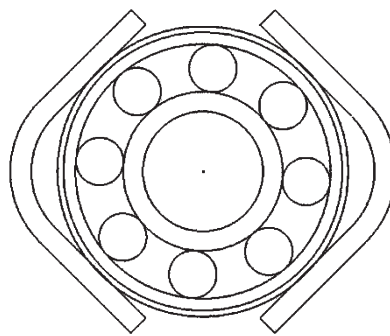


图 2 自适应 V 型手指结构

Fig. 2 Structure of adaptive V-shaped finger

自适应 V 型手指结构采用对称 V 型槽作为手指末端，V 型槽由两个呈特定角度的斜面相交构成，此角度设计为 90°，可进一步拓展至 120°。本设计的核心在于利用 V 型槽的几何特性，即 V 型槽的开口和深度，实现了对不同直径的圆柱筒工件抓取点的自动调节。在夹持不同直径工件时，工件与 V 型槽斜面的接触点位置会随直径大小自动变化。具体而言，当夹持大直径工件时，接触点位于槽口较浅且靠近边缘的位置；当夹持小直径工件时，接触点则移向槽底较深且接近闭合尖端的位置。该位置变化无需额外调节机构，在夹爪闭合过程中自然完成。此外，自适应 V 型手指在抓取过程中可实现自动调心，旨在确保包装筒处于两个 V 型的中心位置，进而有效保障装箱时的精度和程序的可重复性。

### 1.2.2 自适应 V 型手指的夹持力计算

在滚动轴承包装筒抓取作业中，机械手需通过自适应 V 型手指稳定夹持包装筒，防止其掉落。根据静力学平衡原理，当包装筒处于临界不掉落状态时<sup>[4]</sup>，手指与包装筒间的摩擦力需至少抵消包装筒的重力以及转运过程中的冲击力。V 型手指在夹持包装筒过程中构成两组摩擦面，单组夹持面与包装



筒之间的摩擦力为  $\mu F$ , 其中,  $\mu$  为摩擦因数,  $F$  为手指施加于包装筒的夹持力。因此总摩擦力需满足以下约束条件:

$$2\mu F - ma \geq mg, \quad (1)$$

式中:  $m$  为滚动轴承与包装筒的总质量, kg;  $g$  为重力加速度, 取值  $9.8 \text{ m/s}^2$ ;  $a$  为抓取上升过程中的加速度。

在实际生产中, 机械手搬运过程存在冲击、振动(如机械臂启停、工位切换时的惯性扰动等)<sup>[5]</sup>。若仅按临界平衡条件设计, 易因动态载荷导致包装筒滑落。因此, 引入安全系数  $\alpha$  ( $\alpha=4$ )。修正后自适应 V 型手指实际所需夹持力为

$$F \geq \frac{\alpha m(g+a)}{2\mu}. \quad (2)$$

V 型手指可抓取的最大轴承外径为 55 mm, 对应轴承型号为 6006, 该款轴承单个质量为 0.12 kg, 通常一个包装筒放 10 个轴承, 因此, 包装筒的总质量为 1.2 kg。根据《机械设计手册》, 铝与聚乙烯 (PE) 的干摩擦因数范围为 0.15~0.35, 故取  $\mu=0.2$ , 以覆盖表面轻微油污或磨损工况。在工作周期内, 根据动力学分析, 可得最大加速度  $a=1 \text{ m/s}^2$ 。将上述数值代入式 (2) 中, 求得机械手实际所需夹持力应不低于 129.6 N。实际上, 手指上设计有防滑凹槽, 包装筒上的一圈凸筋能卡到凹槽内, 这进一步提升了安全系数。

### 1.2.3 气缸、传感器与机械臂选型

依据自适应 V 型手指实际所需夹持力, 参考亚德客 HFKL 系列气缸参数表, 选定 HFKL25 侧面安装型气缸。此气缸可满足 140 N 的夹持力需求。

传感器安装于气缸活塞杆末端, 通过检测 V 型手指的开合位置 (闭合到位时触发信号), 向 PLC 反馈包装筒是否被有效夹持。若未检测到闭合信号, 系统将触发报警并暂停动作, 避免空抓或夹持不稳导致的漏装、掉落问题<sup>[6]</sup>。为实现滚动轴承包装筒抓取状态的实时监测, 确保机械手动作精准可控, 选用 DMSJ-N020 型电子式传感器 (NPN 三线式)。

机械臂作为机械手的运动载体, 负责带动末端执行器完成“抓取点→装箱位→原点”的循环运动<sup>[7]</sup>。为匹配抓取机械手的工作范围与负载需求, 选用华数机器人 HSR-SR10-800 型 4 轴 SCARA 机械臂, 其参数如表 2 所示。

表 2 HSR-SR10-800 型 4 轴 SCARA 机械臂参数

Table 2 Parameters of HSR-SR10-800 4-axis SCARA manipulator

参 数	说 明
额定负载 / 最大负载	5 kg/10 kg
J1 轴 (基座旋转轴, 旋转关节)	430 (°)/s、7.50 rad/s
J2 轴 (水平伸缩轴, 移动关节)	650 (°)/s、11.34 rad/s
J3 轴 (垂直移动轴, 移动关节)	2200 mm/s
J4 轴 (末端旋转轴, 旋转关节)	2250 (°)/s、39.26 rad/s
重复定位精度	J1、J2 轴为 $\pm 0.025 \text{ mm}$ ; J3 轴为 $\pm 0.01 \text{ mm}$
最大工作半径	800 mm
最大合成速度	9342 mm/s

## 2 机械手控制系统设计

### 2.1 PLC 控制方案

基于 PLC 的滚动轴承包装筒抓取机械手控制系统, 是以西门子 S7-1200 系列 PLC 为核心, 通过传感器信号采集、逻辑运算输出控制指令, 驱动夹爪气缸、机械臂协同动作。控制流程为“包装筒到位检测→机械臂运动定位→夹持力控制→搬运→释放→复位”。

#### 1) 包装筒到位检测

当包装筒通过传输机构到达抓取位时, 安装于传输机构末端 (抓取位前侧) 的 Sick 光电传感器检测到物体到达指定位置, 触发 PLC 输入信号。设传感器检测距离为  $d$ , 有效检测距离为  $d_0$ , 包装筒直径为  $D$  (35~55 mm), 则传感器触发条件为

$$d \leq D + d_0. \quad (3)$$

当包装筒在有效检测距离时, 传感器输出低电平信号, PLC 输入模块 I0.0 置 1, 触发后续机械手抓取流程。

#### 2) 机械臂运动定位

PLC 通过高速脉冲输出模块控制机械臂运动轴 (J1、J2、J3) 联动, 使机械手精准到达抓取位。机械臂从原点 ( $X_0, Y_0, Z_0$ ) 运动至抓取位 ( $X_1, Y_1, Z_1$ ), 空间距离为  $L$ 。依据表 2 中机械臂的最大合成速度为 9342 mm/s, 取机械臂运动速度  $v=500 \text{ mm/s}$ 。运动时间  $t_1$  为

$$t_1 = \frac{\sqrt{(X_1 - X_0)^2 + (Y_1 - Y_0)^2 + (Z_1 - Z_0)^2}}{v} = \frac{L}{v}. \quad (4)$$

#### 3) 夹持力控制

PLC 通过模拟量输出模块控制电磁阀压力, 使气缸输出夹持力 ( $\geq 129.6 \text{ N}$ ), 同时电子式传感器

检测手指闭合信号，反馈至 PLC 输入 I0.1，确认夹持到位。

#### 4) 释放动作控制

气缸复位（手指张开）时间  $t_g$  由电磁阀响应时间  $t_e$  ( $t_e=50\text{ ms}$ ) 和气缸活塞行程  $s$  决定。设气缸平均速度为  $v_u$ ，则  $t_g$  为

$$t_g = \frac{s}{v_u} + \frac{t_e}{1000} \quad (5)$$

## 2.2 PLC 程序设计

基于包装筒抓取时机械手的动作流程，参照西门子程序编辑指令<sup>[8]</sup>，采用博途 V15 编写程序指令，其梯形图程序如图 3 所示。

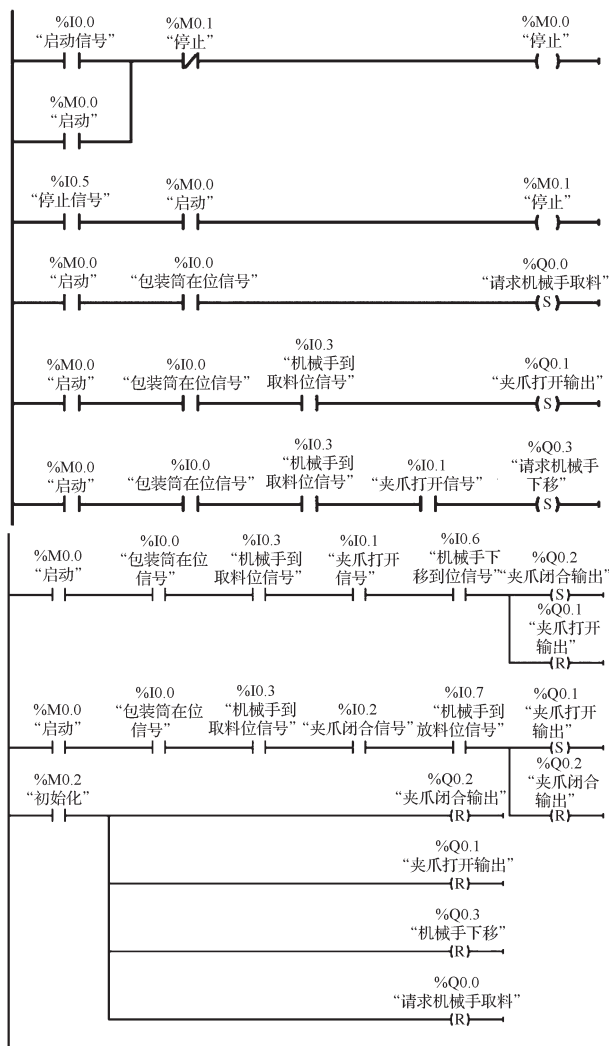


图 3 梯形图程序

Fig. 3 Ladder diagram program

程序分为 8 段：第 1 段控制启动和停止互锁；第 2 段控制急停；第 3 段检测到包装筒在位信号后，控

制机械手达到取料位置；第 4 段机械手到达取料位置后，控制夹爪打开；第 5 段机械手夹爪打开后，控制机械手下移到包装筒的抓取位置；第 6 段控制夹爪闭合，抓紧包装筒；第 7 段主控系统下发指令，伺服驱动机械臂携机械手移至放料位置；第 8 段初始化，系统执行原点回归程序。

## 3 仿真分析

### 3.1 动力学分析

为验证本文设计的滚动轴承包装筒抓取机械手动态性能，借助 Adams 软件构建虚拟样机模型<sup>[9]</sup>。首先，依据机械手各部件的实际尺寸、材质及装配关系，利用 Catia 等三维建模软件精准创建各零件的三维模型，并完成整体装配，形成完整的机械手三维装配体；其次，将装配体以 STEP 通用数据格式导出，并导入到 Adams 软件环境中；然后，在 Adams 软件中为各部件设置材料属性，如铝合金 6061-T6 的密度、弹性模量、泊松比等参数，通过添加运动副，如用于模拟气缸活塞运动的移动副、模拟部件间连接的固定副等，定义各部件之间的相对运动关系，同时根据实际工作要求，设置驱动函数，如模拟夹爪气缸伸缩的位移驱动，依据气缸工作特性设定其运动规律<sup>[10]</sup>，最终搭建出能够反映机械手真实运动状态的虚拟样机模型，如图 4 所示。

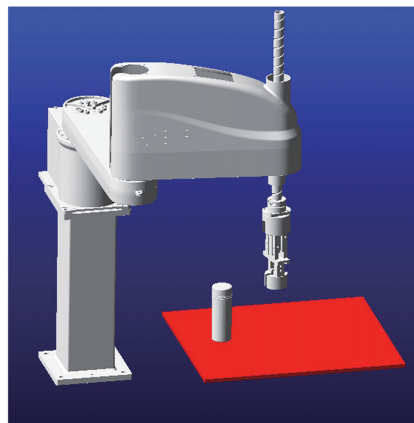


图 4 滚动轴承包装筒抓取机械手仿真模型

Fig. 4 Simulation model of gripping manipulator for rolling bearing packaging tubes

在 Adams 软件内验证滚动轴承包装筒抓取机械手的运动学特性。机械手在抓取滚动轴承包装筒时 X、Y、Z 向的加速度 - 时间曲线如图 5 所示。

根据图 5 并结合运动过程分析，0~5 s 时，机械手逐渐张开手指，并逐渐接近包装筒的位置，加速度

在  $0\sim 200\text{ mm/s}^2$  之间, 存在微振动干扰;  $5\sim 10\text{ s}$  时, 机械手开始抓取包装筒, 并带动包装筒到达纸箱预定的位置, 加速度最高升至  $1200\text{ mm/s}^2$  (约  $0.12g$ , 其中  $g$  取  $9800\text{ mm/s}^2$ ), 这是因为机械手刚抓取包装筒转运时存在启动冲击, 抓稳后加速度迅速回落, 当达到纸箱预定位置时机械手趋于平稳;  $10\sim 18\text{ s}$  时, 机械手将包装筒放入纸箱, 并松开手指, 之后返回原点, 该过程加速度在  $0\sim 600\text{ mm/s}^2$  之间。总体而言, 机械手在抓取滚动轴承包装筒过程中运动平稳, 可满足工程实际要求。因在负载切换阶段 ( $5\sim 10\text{ s}$ ) 存在轻微的启动冲击, 可在 J3 轴增设加速度前馈补偿, 以抑制  $5\sim 10\text{ s}$  时的超调, 并在法兰连接块与转接座间加装橡胶阻尼垫, 以衰减  $0\sim 5\text{ s}$  时的高频微振, 同时将复位速度从  $2200\text{ mm/s}$  降至  $1800\text{ mm/s}$ , 以压缩  $10\sim 18\text{ s}$  时的加速度幅值, 最终整体运行更为平稳。值得注意的是, 夹爪气缸内置的弹簧-阻尼单元在瞬时冲击下可提供约  $8\text{ N/mm}$  等效刚度与  $0.15$  阻尼比, 形成被动减振层, 使加速度峰值再降低约  $12\%$ , 使实际工况中系统的加速度响应呈现“幅值小、衰减快”的特征<sup>[11]</sup>。

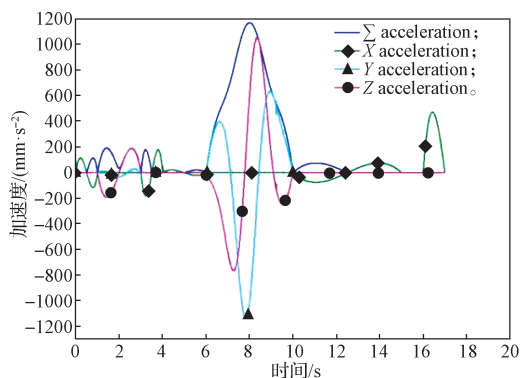


图5 滚动轴承包装筒抓取机械手的运动平稳性结果  
Fig. 5 Motion stability results of gripping manipulator for rolling bearing packaging tubes

为进一步验证本文设计的滚动轴承包装筒抓取机械手在频域内的动态特性, 利用 Adams/Vibration 模块进行谐响应分析。谐响应分析是指对系统施加持续的正弦波形式激励, 用于评估系统在周期性稳态激励下的响应特性, 是预测结构共振风险的典型频域分析方法<sup>[12]</sup>。在卡爪抓取的中间平面上沿径向施加  $10\text{ N}$  的集中正弦波激励, 进一步得到卡爪末端底部中间节点处的加速度-频率曲线, 如图 6 所示。

由图 6 可知, 在  $0\sim 120\text{ Hz}$  的频率范围内, 加

速度随激励频率的变化呈现出显著特征。在起始阶段, 当频率处于  $1\sim 3\text{ Hz}$  时, 加速度达到最高值 (约  $400\text{ mm/s}^2$ ), 随后加速度在  $4\text{ Hz}$  内骤降至约  $160\text{ mm/s}^2$ , 进入  $20\sim 120\text{ Hz}$  宽频带后, 加速度稳定于  $160\text{ mm/s}^2$  以下。由此可知, 在实际工作环境中, 该机械手在遭受机械臂主轴激励以及车间振动等外界激励干扰时, 不会产生明显的振动响应。这表明该机械手具有良好的动态载荷适应性与抗震性能, 能够有效规避因共振引发的包装筒抓取不稳定、机械手部件疲劳损坏等问题, 从而确保自动化包装作业的稳定性与可靠性。

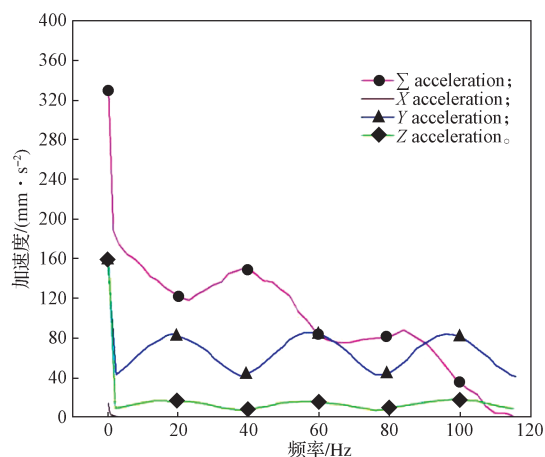


图6 滚动轴承包装筒抓取机械手的谐振响应曲线  
Fig. 6 Resonance response curve of gripping manipulator for rolling bearing packaging tubes

### 3.2 强度分析

滚动轴承包装筒抓取机械手的强度对抓取精度与稳定性具有直接影响。在连续作业过程中, 若其结构强度不足, 甚至会出现断裂现象, 进而对生产造成影响, 给企业带来经济损失。因此, 有必要对机械手结构件的强度展开分析, 以确保机械手实现连续作业。在 Abaqus 隐式静力学模块中对法兰连接块、转接座、夹爪气缸及 V 型手指进行强度分析。采用 Newton-Raphson 法求解非线性平衡方程, 设置力/位移混合收敛容差  $1 \times 10^{-4}$ 、增量步上限  $0.05$ , 以保证增量步收敛。

建模详细过程如下:

1) 创建有限元网格模型。该模型为不规则形状, 故而网格类型选用 C3D10M 四面体网格, 将网格大小设定为  $2.0$ , 对各个零件依次开展网格划分操作, 得到有限元模型的节点数量为  $469\,337$  个, 单元数量为  $313\,282$  个。有限元网格模型如图 7 所示。



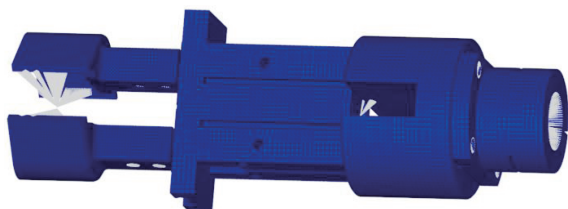
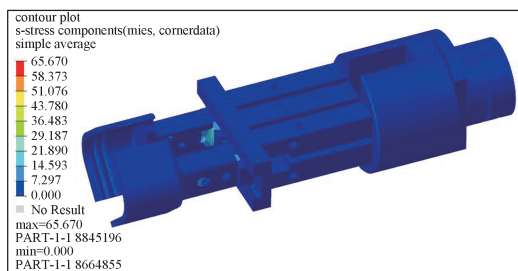


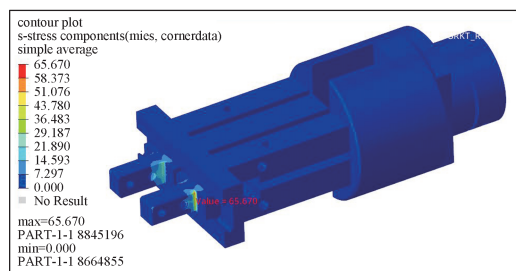
图7 滚动轴承包装筒抓取机械手的有限元模型

Fig. 7 Finite element model of gripping manipulator for rolling bearing packaging tubes

2) 定义网格边界条件。设定法兰连接块与机械臂主轴连接的内孔表面为6自由度约束。各部件之间通过螺栓连接,因而通过梁单元的刚性连接来模拟螺栓连接。各个零件之间的接触面设置为共节点,



a) 总体应力云图



b) 局部应力云图

图8 机械手 Mises 应力分布

Fig. 8 Mises stress distribution of the manipulator

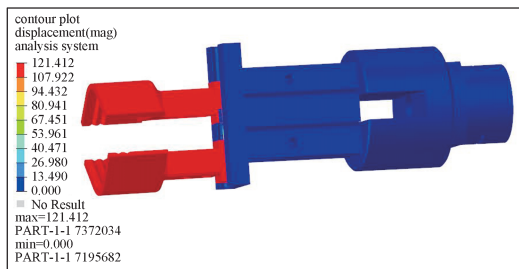
由图8可知,机械手的最大应力为65.67 MPa,位于卡爪的根部,该值远小于屈服强度,可满足使用强度要求。

### 3.3 模态分析

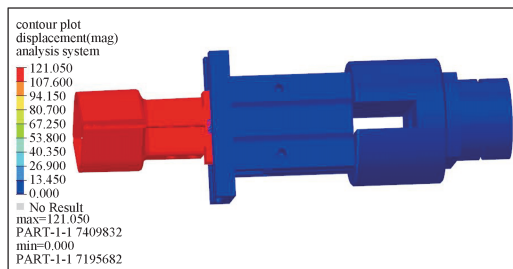
高速轻量机械手易与伺服频带耦合共振,导致定位失稳与末端抖动。通过模态分析辨识固有频率及振型,能有效避开激励频段、优化结构刚度并校准控制参数,从而保障运动精度与作业可靠性。4轴SCARA机械臂J4轴的最高转速为39.26 rad/s,将其换算为频率则为6.25 Hz。鉴于该轴与机械手为直接固定连接,机械手的结构模态应避免处于6.25 Hz。

在设计过程中,选取3倍及以上的安全系数,因此,为确保在工作过程中不出现共振现象,第1阶模态频率需高于18.75 Hz。

采用Lanczos算法<sup>[13]</sup>对机械手的有限元网格模型开展模态求解。该算法是在Krylov子空间对准最小特征值方向,收敛速度随阶次升高而迅速降低。因此,低频模态最先被算出,高频段则被自动截断。工程上需要的主要是低频段,这样可省去大量无效计算。目前,在Nastran、Ansys、Abaqus、OptiStruct等主流仿真软件中,模态求解默认推荐Lanczos算法。机械手前6阶模态振型如图9所示。



a) 第1阶共振频率82.9 Hz



b) 第2阶共振频率87.0 Hz

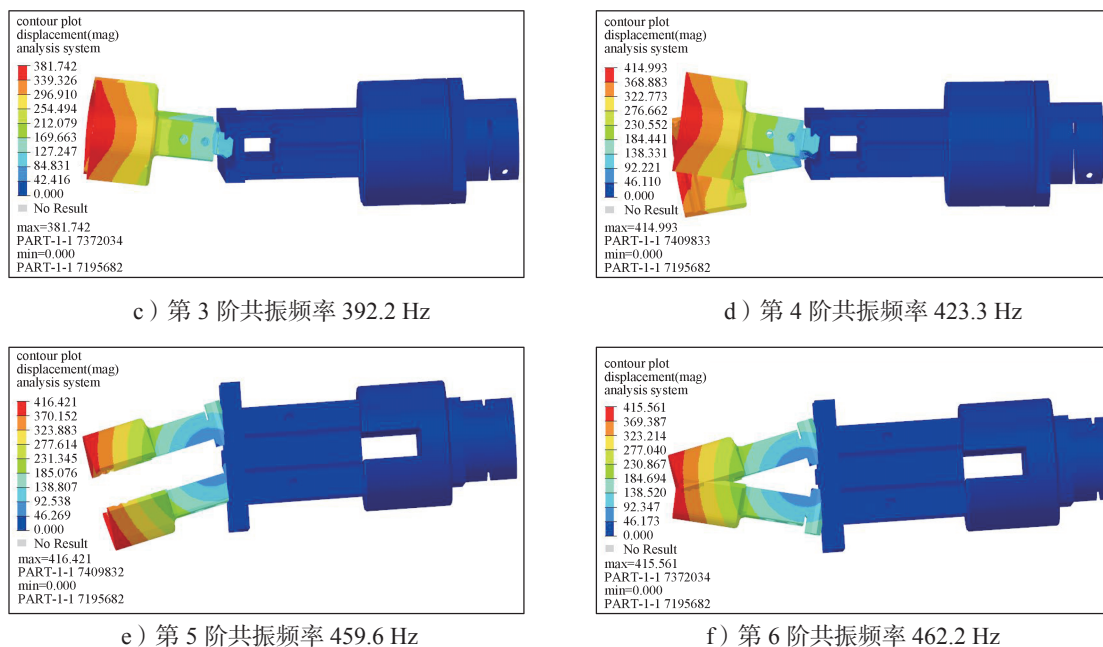


图9 机械手前6阶模态振型

Fig. 9 First six-order modal shapes of the manipulator

结构固有频率的核心规律可通过单自由度系统简化模型<sup>[14]</sup>进行描述,即

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m}}, \quad (6)$$

式中:  $f_0$  为结构固有频率;  $K$  为结构刚度;  $m$  为结构质量。

从式(6)可知,在刚度满足要求的前提下,结构质量越小,固有频率越高。

由图9可知,本设计的第1阶固有频率达82.9 Hz,远高于工作激励频率(6.25 Hz),后续阶次固有频率也处于较高水平。结合“ $f_0 \propto \frac{1}{\sqrt{m}}$ ”可知,通过结构轻量化设计和铝合金材料的应用,既确保了刚度要求,又实现了固有频率的大幅提高。

## 4 结论

本研究针对中小企业滚动轴承包装的实际生产需求,设计了一款具有高适配性、低成本特点的滚动轴承包装筒抓取机械手,并构建了基于西门子S7-1200系列PLC的协同控制流程。通过对机械手整体结构、V型手指这一核心部件进行有针对性地优化,同时选择HFKL25气缸、DMS传感器、华数4轴机械臂,实现了多规格包装筒的稳定抓取与高效转运。仿真结果表明,该机械手能够适配外径为35~55 mm

的滚动轴承包装筒,夹持力不低于129.6 N,且防滑、防脱落;全流程运动冲击处于可控范围,抗震性与结构强度满足连续作业要求。与商用轴承包装设备相比,本设计的核心优势体现为低成本与高柔性。采用铝合金6061-T6实现设备轻量化,显著降低了设备制造成本;自适应V型手指无需进行额外改装即可适配多种规格的工件,可直接与中小企业多品种、小批量的生产场景对接,无需进行大规模的产线改造。本文设计的机械手为中小企业轴承包装自动化提供了高性价比的解决方案。

## 参考文献:

- [1] 徐光宇,汤卿,王丽霞. 腱绳驱动机械手的设计及其柔性抓取控制[J]. 机电工程, 2023, 40(10): 1550-1557.
- [2] 付敏,王成梦,郝镒林,等. 变结构气动软体机械手的设计及试验研究[J]. 机床与液压, 2023, 51(13): 7-13, 26.
- [3] Eberlein W. Take Control of Complex Motion Sequences[J]. Kunststoffe PlasEurope, 2005, 95(1): 72-73.
- [4] 曹现刚,向敬芳,王鹏,等. 混合工作模式的双路径传动欠驱动机械手设计与接触力学分析[J]. 机械传动, 2025, 49(2): 62-69.
- [5] 王现龙,张萌,李波. 数字孪生的气动机械手系

- 统设计[J]. 液压与气动, 2025, 49(4): 11-21.
- [6] 朱立红, 谈家恣, 仲佳骏, 等. 基于四棱柱折叠单元的机械手设计及运动特性分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2025, 48(5): 577-582, 597.
- [7] 王静国, 管声启, 张凡, 等. 绳驱动纱筒抓取仿生机械手设计[J]. 软件, 2020, 41(4): 1-5.
- [8] LWIN H Y, HTAY U H M. Design and Simulation of Automated Packaging Machine Process Control by Using PLC[J]. International Journal of Trend in Scientific Research and Development, 2019, 3(5): 1423-1426.
- [9] 王良文, 王团辉, 穆亚林, 等. 圆柱内壁工件的内撑式抓取与装配机械手设计[J]. 机械传动, 2019, 43(9): 166-170.
- [10] 朱海峰, 饶丽娟. 基于CATIA软件的抓取纱筒机械手设计[J]. 上海纺织科技, 2020, 48(6): 14-16.
- [11] Angeles J. Dynamic Response of Linear Mechanical Systems: Modeling, Analysis and Simulation[M]. New York: Springer, 2011: 389-418.
- [12] Ewins D J. Vacuum Moulding: Theory, Practice and Application[J]. Reinforced Plastics, 2003, 47(4): 38-43.
- [13] 刘丹, 王琥, 李恩颖, 等. 基于Lanczos算法的模态重分析法及其在车身结构设计中的应用[J]. 计算力学学报, 2015, 32(2): 167-173.
- [14] 韩清凯, 翟敬宇, 张昊. 机械动力学与振动基础及其数字仿真方法[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2016: 272.

(责任编辑: 邓彬)

## Design and Control Strategy of a Grasping Manipulator for Rolling Bearing Packaging Tubes

LI Yingchun, ZHAO Zhun, YAO Qishui

(School of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract:** To realize the automatic grasping of rolling bearing packaging tubes and solve the problems of low efficiency, high cost and easy damage in manual packaging for small and medium-sized enterprises, a gripping manipulator for rolling bearing packaging tubes and its control strategy are designed. This manipulator operates in coordination by components such as flange connection blocks, adapter seats, gripper cylinders, V-shaped fingers. Among them, the V-shaped fingers adopt an adaptive structure, which can be adapted to packaging tubes with an outer diameter of 35~55 mm. Through the clamping force calculation, the HFKL25 cylinder is selected, which is matched with DMS series sensors and Huashu HSR-SR10-800 4-axis manipulator. Meanwhile, the control process is constructed based on Siemens S7-1200 PLC. The simulation results show that the manipulator operates smoothly during the whole process of grasping, transporting and resetting, with good coordination in three-directional displacement. It has a low and stable frequency response in the range of 0~120 Hz, and possesses excellent dynamic load adaptability and shock resistance. While meeting the requirements for precision and stability of automated packaging, the manipulator can help enterprises optimize processes, reduce costs and improve efficiency.

**Keywords:** rolling bearing; packaging tube; gripping manipulator; V-shaped finger; PLC control