

柔性并联机构手指的机械手结构参数优化

李秋苹¹, 章军¹, 崔军², 周浪³

(1.江南大学 机械工程学院, 无锡 214122; 2.常熟开关制造有限公司, 常熟 215500;

3.华中科技大学 无锡研究院, 无锡 214000)

摘要: **目的** 为了满足生产中分拣软塑料食品罐的需求, 提出一种柔性并联机构手指的机械手。**方法** 以机械手静止负载时和悬停负载时抓取力之差最小为优化目标, 运用 Matlab 软件中的 fsolve 函数和 for 循环语句求出机械手优化参数的解。**结果** 以质量不超过 0.25 kg 的塑料食品罐为抓取对象, 计算得出机械手静止负载和悬停负载时抓取力之差不超过 1 N。**结论** 在不损坏物体表面的前提下, 可以实现对目标抓取物的稳定抓取。

关键词: 串联双铰链; 柔性机械手; 双电机驱动; Matlab; 力学模型; 参数优化

中图分类号: TP241 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)11-0188-05

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.11.033

The Structure Parameters Optimization of Compliant Manipulator with Parallel Mechanism Fingers

LI Qiu-ping¹, ZHANG Jun¹, CUI Jun², ZHOU Lang³

(1.School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2.Changshu Switch

Manufacturing Co., Ltd., Changshu 215500, China; 3.Wuxi Research Institute of Huazhong

University of Science and Technology, Wuxi 214000, China)

ABSTRACT: The work aims to propose a kind of compliant manipulator with parallel mechanism fingers to meet the need of sorting the soft plastic food cans during production. With the minimum difference between the grasping forces of the manipulator under static load and hovering load as the optimal target, the optimal parameters of the manipulator were solved by the fsolve function and for loop statement of matlab software. With the plastic food can (no more than 0.25 kg) as the grasped object, the difference between the grasping forces of the manipulator under static load and hovering load was calculated and no more than 1 N. The manipulator can stably grasp the target without damaging its surface.

KEY WORDS: tandem two hinges; compliant manipulator; twin motor drive; Matlab; mechanical model; parameter optimization

在食品行业中, 为了防止在运输过程中出现挤压或撞击, 很多食品(饼干蜜饯等)采用圆柱形软塑料罐进行包装。在分拣抓取软塑料食品罐的过程中, 易出现食品罐压瘪等问题, 因此为了保证食品外观的完整性, 对食品罐的柔性抓取尤为重要。

一般意义上的柔性关节是由大柔度杆或柔性铰链等构成的柔性系统与刚性系统所组成的混合系统^[1]。

FESTO 公司的 MultiChoiceGripper 是一种新型的柔性机械手, 它有 2 种快换手指结构, 其中一种手指机构以人类大拇指为灵感, 具有极好的抓取自适应性^[2], 其缺点是抓取力比较小, 由橡胶材料制成, 容易老化、寿命短。目前柔性关节机械手大多为以气压为驱动, 存在控制精度低, 抓取物体通用性不够好等缺点^[3-6]。

文中提出一种由 2 个电机驱动的三指机械手, 机

收稿日期: 2018-01-02

基金项目: 江苏省数控一代机械产品创新区域应用示范工程(2015BAF25B00)

作者简介: 李秋苹(1991—), 女, 江南大学硕士生, 主攻欠驱动柔性机械手结构设计。

通信作者: 章军(1965—)男, 博士, 江南大学教授, 主要研究方向为复合驱动与关节型机器人。

机械手的柔性体现在手指具有串联双铰链结构^[7-9]。针对具体抓取对象, 优化2个铰链上扭弹簧参数和机械手结构尺寸后, 可通过2个含扭弹簧铰链的弹性协调转动, 满足抓持力要求而不必精确控制各铰链角位移, 具有柔性自适应性。手指指跟节角度可调, 在手指转动平面范围内, 手指上每个点作用空间是变化的。针对具体抓取对象, 在捏取时, 通过精确控制驱动杆行程, 可改变接触力大小和接触点高度。无需传感器反馈, 成本低, 适应性强。

1 机械手结构和工作原理

机械手的结构见图1。机械手主要由驱动传动机构和手指结构等2部分组成。驱动传动机构: 驱动固定盘3与手指座固定盘13通过2根支撑导柱4连接, 支撑导柱4分别穿过指尖驱动盘6和指跟驱动盘9上的直线轴承5。指尖驱动步进电机1和指跟驱动步进电机2用螺钉固定在驱动固定盘3上, 丝杆的另一端分别固定在手指座固定盘13的丝杆固定轴承12上; 指尖驱动步进电机1的丝杆穿过指跟驱动盘9上的孔, 通过丝杆螺母8与指尖驱动盘6连接, 3根指尖

驱动杆7一端通过螺母连接在指尖驱动盘6上, 另一端通过销轴连接在二力杆14上, 二力杆14通过销轴连接在二力杆座15上; 指跟驱动步进电机2的丝杆穿过指尖驱动盘6上的孔, 用丝杆螺母8与指跟驱动盘9连接, 3根推杆11一端通过推杆座10连接在指跟驱动盘9上, 另一端通过销轴连接在指跟节22上。

手指结构: 柔性机械手3个指尖节16通过螺钉与二力杆座15连接, 指跟节22通过销轴安装在指跟座23上, 指跟座23用螺钉固定在手指座固定盘13上, 指尖节16、中指尖节20和指根节22用销轴18连接, 2个销轴18上分别装有小扭弹簧17和大扭弹簧21, 中指尖节19上装有可调节小扭弹簧17初始预紧角的旋钮19。

电机2带动丝杆转动, 由于支撑导柱4对丝杆螺母8有限制作用, 丝杆螺母带动指跟驱动盘9上下运动, 从而带动推杆11运动, 改变指跟节和手指座固定盘的夹角。电机1正转时, 丝杆螺母带动指尖驱动盘6向下运动, 指尖驱动杆7则推动手指克服小扭弹簧和大扭弹簧的弹性力, 使2个串联活页铰链转动, 指尖的曲面段接触被抓物体, 从而抓持物品; 电机1反转时, 丝杆螺母带动指尖驱动盘6向上运动, 机械手手指张开, 电机断电, 其内部螺杆螺母机构自锁, 可保持抓力不变。

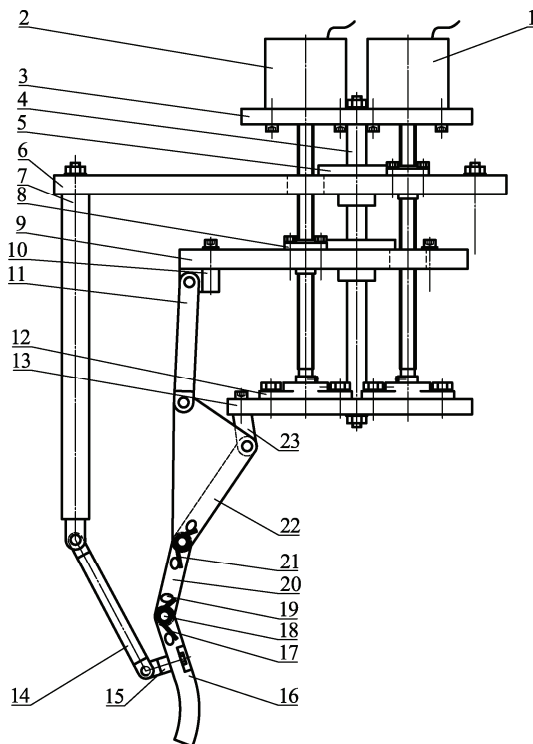
2 机械手力学模型

在圆柱形塑料食品罐的抓取过程中, 由于柔性手指结构, 机械手状态有: 未接触情况下手指的空载运动; 接触后圆柱未运动, 但接触力随推杆行程的增大而增大, 接触力的作用点位置变化, 此为机械手静止负载阶段; 当抓取力增大到满足抓取要求时, 将圆柱缓慢抓起后, 机械手静止悬停, 即为机械手悬停负载阶段。

2.1 机械手空载时力学模型

机械手的空载结构可简化, 见图2a。B、C点为2个串联活页铰链手指关节的中心, 以通过机械手手掌中心的垂串联活页铰链手指关节为中心, 以通过机械手手掌中心的垂线为y轴, 过A点的水平线为x轴, z轴垂直纸面向外, 建立坐标系。

机械手指根节与手指固定盘的夹角为 α ; 手指连接处A点到机械手中心的水平距离 l_1 ; 指跟节关节中心B点到手指连接处A点的长度为 a_1 ; 关节B与C中心距为 a_2 ; 指尖节关节中心C点到手指末端驱动固定座的距离为 a_3 ; 手指末端驱动固定座的长度为 c ; 手指连接处A点到机械手指驱动杆中心距离为 l_2 ; 指尖圆弧的半径为 r ; 圆弧切点沿指尖节到手指末端驱动固定座中心的距离为 b ; 二力杆的长度为 d ; 手指



1. 指尖驱动周边步进电机 2. 指跟驱动步进电机 3. 驱动固定盘 4. 支撑导柱 5. 直线轴承 6. 指尖驱动盘 7. 指尖驱动杆 8. 丝杆螺母 9. 指跟驱动盘 10. 推杆座 11. 推杆 12. 丝杆固定轴承 13. 手指座固定盘 14. 二力杆 15. 二力杆座 16. 指尖节 17. 小扭弹簧 18. 销轴 19. 旋钮 20. 中指尖节 21. 大扭弹簧 22. 指根节 23. 指跟座

图1 机械手结构

Fig.1 Structure of manipulator

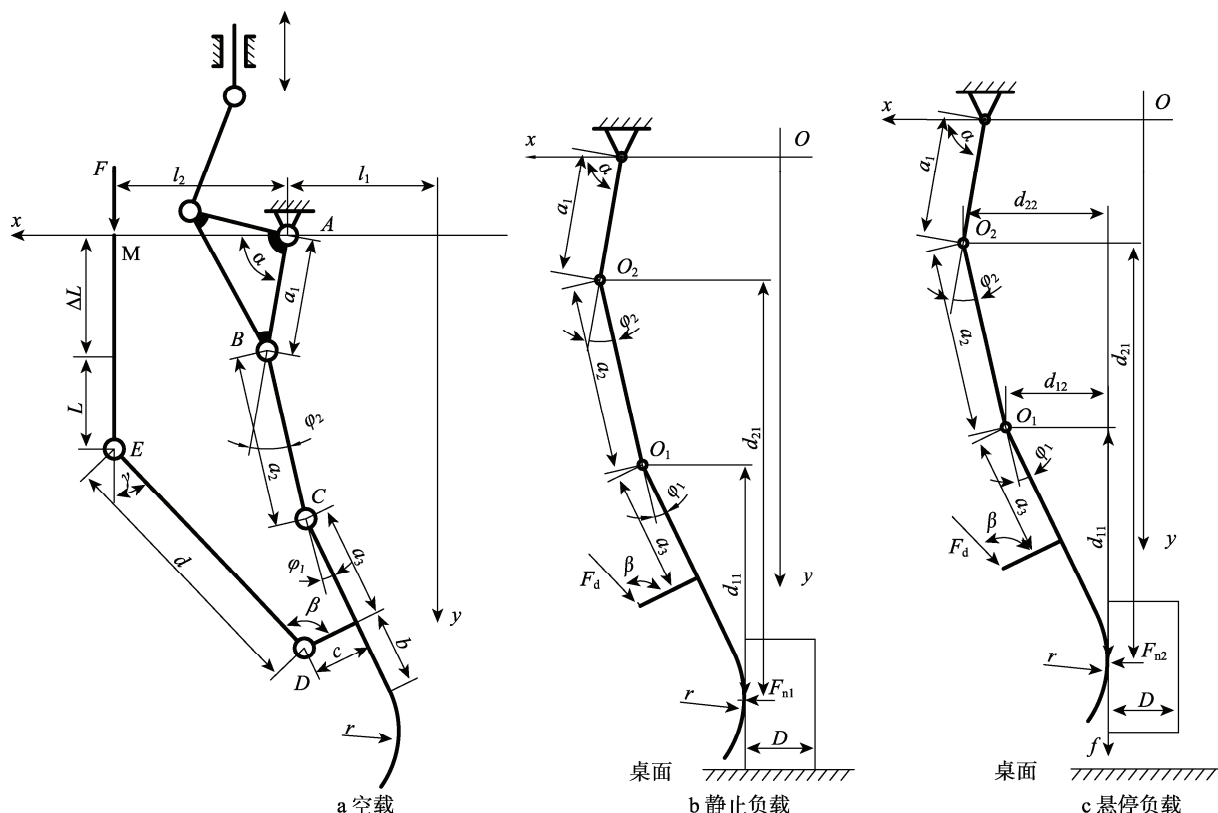


图2 机械手空载及各负载状态

Fig.2 Non-load condition and all kinds of load conditions of the manipulator

驱动推行程为 ΔL ；手指驱动杆超出手指固定盘的长度为 L ；二力杆与机械手指驱动杆的夹角为 γ ；二力杆与手指末端驱动固定座的夹角为 β 。

机械手空载时,假设各运动副摩擦力和各部件重力均忽略不计;除扭弹簧外,其余部件为刚体,铰链 B 与 C 扭矩平衡方程为^[10-11]:

$$k_1 \cdot 180/\pi \cdot (\varphi_1 + \varphi_{01}) = F_d c \sin \beta - F_d a_3 \cos \beta \quad (1)$$

$$k_2 \cdot 180/\pi \cdot (\varphi_2 + \varphi_{02}) = F_d c \sin \beta - F_d a_3 \cos \beta - F_d a_2 \cos(\varphi_1 + \beta) \quad (2)$$

式中: k_1, k_2 为弹簧的刚度(N·mm/(°)); $\varphi_{01}, \varphi_{02}$ 为扭弹簧预紧角(rad); φ_1, φ_2 为扭弹簧扭转角(rad); F_d 为二力杆的推力(N)。

2.2 机械手静止负载时力学模型

以直径为 D 的圆柱为抓取对象,机械手静止负载示意图见图 2b。铰链 O_1 与 O_2 扭矩平衡方程为:

$$k_1 \cdot 180/\pi \cdot (\varphi_1 + \varphi_{01}) = F_d c \sin \beta - F_d a_3 \cos \beta - F_n d_{11} \quad (3)$$

$$k_2 \cdot 180/\pi \cdot (\varphi_2 + \varphi_{02}) = F_d c \sin \beta - F_d a_3 \cos \beta - F_d a_2 \cos(\varphi_1 + \beta) - F_n d_{21} \quad (4)$$

式中: F_n 为机械手手指对圆柱的抓取力的反作用力(N)。 d_{11} 为抓取力 F_n 对 O_1 点的力臂(mm); d_{21} 为抓取力 F_n 对 O_2 点的力臂(mm); $d_{11} = (b + a_3) \sin(\alpha + \varphi_1 + \varphi_2) - r \cos(\alpha + \varphi_1 + \varphi_2)$; $d_{21} = a_2 \sin(\alpha + \varphi_2) + (b + a_3) \sin(\alpha + \varphi_1 + \varphi_2) - r \cos(\alpha + \varphi_1 + \varphi_2)$ 。

2.3 机械手悬停负载时力学模型

以直径为 D 的圆柱为抓取对象,机械手悬停负载示意图见图 2c。铰链 O_1 与 O_2 扭矩平衡方程为:

$$k_1 \cdot 180/\pi \cdot (\varphi_1 + \varphi_{01}) = F_d c \sin \beta - F_d a_3 \cos \beta - F_n d_{11} - f d_{12} \quad (5)$$

$$k_2 \cdot 180/\pi \cdot (\varphi_2 + \varphi_{02}) = F_d c \sin \beta - F_d a_3 \cos \beta - F_d a_2 \cos(\varphi_1 + \beta) - F_n d_{21} - f d_{22} \quad (6)$$

式中: f 为手指与圆柱之间的静摩擦力(N); d_{12} 为摩擦力 f 对 O_1 点的力臂(mm); d_{22} 为摩擦力 f 对 O_2 点的力臂(mm); $d_{12} = -(b + a_3) \cos(\alpha + \varphi_1 + \varphi_2) + r - r \sin(\alpha + \varphi_1 + \varphi_2)$; $d_{22} = -a_2 \cos(\alpha + \varphi_2) - (b + a_3) \cos(\alpha + \varphi_1 + \varphi_2) + r - r \sin(\alpha + \varphi_1 + \varphi_2)$ 。

2.4 机械手指变形协调方程

抓取对象为半径为 R 的圆柱,则:

$$R = l_1 + a_1 \cos \alpha + a_2 \cos(\alpha + \varphi_2) + (b + a_3) \cdot \cos(\alpha + \varphi_1 + \varphi_2) - r + r \sin(\alpha + \varphi_1 + \varphi_2) \quad (7)$$

在 x - y 坐标系中,由七边形 $ABCDEM$ 内角和和七边形 x 方向边长关系可知:

$$\beta = \pi + \gamma - \alpha - \varphi_1 - \varphi_2 \quad (8)$$

$$d \sin \gamma = l_2 - a_1 \cos \alpha - a_2 \cos(\alpha + \varphi_2) - a_3 \cos(\alpha + \varphi_1 + \varphi_2) - c \sin(\alpha + \varphi_1 + \varphi_2) \quad (9)$$

由七边形 y 方向边长关系可得,机械手驱动杆行

程为：

$$\Delta L = a_1 \sin \alpha + a_2 \sin(\alpha + \varphi_2) + a_3 \sin(\alpha + \varphi_1 + \varphi_2) - c \cos(\alpha + \varphi_1 + \varphi_2) - d \cos \gamma'$$

(10)

式中： γ' 由公式 $d \sin \gamma' = l_2 - (a_1 + a_2 + a_3) \cos \alpha - c \sin \alpha$ 计算得出。

3 机械手结构参数优化

3.1 优化目标的确定

设机械手静止负载时的抓取力为 F_{n1} ，机械手悬停负载时的抓取力为 F_{n2} 。摩擦力 f 与 F_{n2} 的关系为 $f = \mu \cdot F_{n2}$ ， μ 为机械手指与圆柱形软塑料罐之间的静摩擦因数。要求摩擦力 $f \geq mg/3$ ，则 f 至少为 $mg/3$ ， g 为重力系数。给定一个安全系数 s ，则 $fs = mg/3$ 。综上可得 $F_{n2} = mg/(3\mu s)$ 。此时，机械手静止负载时的抓取力为 F_{n1} ， $\Delta N = F_{n1} - F_{n2}$ 。优化目标为： F_{n2} 满足要求时， ΔN 最小。

影响机械手抓取力的参数有很多，此处选取对抓取力变化影响最大的几个参数。选取的参数有 6 个：指跟节角度 α 和驱动固定座的长度 c ，以及扭弹簧参数 $k_1, k_2, \varphi_{01}, i_{02}$ 。设定其余机械手尺寸为： $a_1 = 40 \text{ mm}$ ， $a_2 = 40 \text{ mm}$ ， $a_3 = 20 \text{ mm}$ ， $b = 20 \text{ mm}$ ， $d = 70 \text{ mm}$ ， $l_1 = 50 \text{ mm}$ ， $l_2 = 60 \text{ mm}$ ， $r = 36 \text{ mm}$ 。

3.2 优化参数的求解

在机械手静止负载时，多变量非线性方程组可运用 Matlab 中的 fsolve 函数，通过对机械手抓取力 F_{n2} 赋值，可以计算出对应的驱动杆行程 ΔL_2 [12—13]；把从机械手悬停负载时得到的驱动杆行程 ΔL_2 赋给机械手静止负载时的驱动杆行程 ΔL_1 ，就可得到机械手抓取力 F_{n1} 。

借助 Matlab 软件的 for 循环语句 [14]，从 $\alpha = \pi/3$ 开始循环计算，到 $\alpha = 17\pi/36$ 结束，步长为 $\pi/36$ ；内部镶嵌二级 for 循环语句，从 $c = 0$ 开始循环计算，到 $c = 30$ 结束，步长为 1；以此类推，直到内部镶嵌六级 for 循环语句，从 $\varphi_{02} = 0$ 开始循环计算，到 $\varphi_{02} = \pi$ 结束，步长为 $\pi/90$ 。然后从所有计算结果中选取满足约束条件的最优解。

表 1 优化参数循环求解范围
Tab.1 Optimization parameter cycle solution range

参数	α	c	k_1	k_2	φ_{01}	φ_{02}
开始值	$\pi/3$	0	0	0	0	0
结束值	$17\pi/36$	30	30	30	π	π
步长	$\pi/36$	1	1	1	$\pi/90$	$\pi/90$

3.3 实例计算

实际生产中，采用直径为 85 mm 的圆柱形塑料

食品罐进行包装较多，因此以直径为 85 mm，高为 100 mm 的塑料食品罐为抓取对象，塑料和钢之间的静摩擦因数 $\mu = 0.27$ [15]，安全系数 $s = 0.8$ ，重力系数 $g = 9.8 \text{ N/kg}$ 。计算表明，当 $\alpha = \pi/3 \text{ rad}$ ， $c = 0 \text{ mm}$ ， $k_1 = 0 \text{ N}\cdot\text{mm}/(^{\circ})$ ， $k_2 = 30 \text{ N}\cdot\text{mm}/(^{\circ})$ ， $\varphi_{01} = 0 \text{ rad}$ ， $\varphi_{02} = 1.274 \text{ rad}$ 时， ΔN 最小。 $D = 85 \text{ mm}$ 圆柱抓取力随推杆行程变化见图 3。当塑料食品罐装有蜜饯坚果等食品，质量 m 一般不会大于 0.25 kg，则食品罐被抓起时所需最小抓取力 $F_{n2} = mg/(3\mu s) = 3.78 \text{ N}$ 。由图 3 可知，此时 $F_{n1} = 4.50 \text{ N}$ ， $\Delta N = F_{n1} - F_{n2} = 0.72 \text{ N}$ ，抓取力变化较小，不会损坏物体表面，抓取效果较好。机械手参数优化后能满足直径为 85 mm 的圆柱形食品罐的抓取要求。

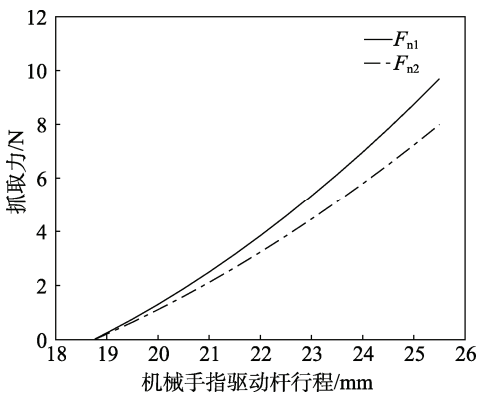


图 3 直径为 85 mm 的圆柱形食品罐
抓取力随推杆行程的变化

Fig.3 $D = 85 \text{ mm}$ cylindrical food can grasping
force changing with push rod stroke

4 结语

对提出的柔性机械手进行了结构设计和受力分析，建立了机械手空载、静止负载和悬停负载时的力学模型。在保证食品罐能被稳定抓取的前提下，以机械手静止负载和机械手悬停负载状态抓取力之差最小为优化目标，运用 Matlab 软件中的 fsolve 函数和 for 循环语句求出机械手优化参数的解。计算结果表明，此机械手通过控制驱动杆行程，可以实现调节抓取力的大小，在不损坏物体表面的前提下，可以实现对目标抓取物的稳定抓取。该机械手结构简单，成本低廉，在形状复杂、物性多样的产品（软包装物品、瓜果）的分拣中有广泛的应用前景。

参考文献：

[1] 于靖军, 裴旭, 毕树生, 等. 柔性铰链机构设计方法的研究进展[J]. 机械工程学报, 2010, 46(13): 2—13.
YU Jing-jun, PEI Xu, BI Shu-sheng, et al. Research Progress of Design Method of Flexible Hinge Mechanism[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010,

- 46(13): 2—13.
- [2] Festo 公司. Multi choice Gripper 宣传手册[DB/OL]. [2017-11-11]. <https://www.festo.com.cn/group/zh/cms/10221.htm>.
Festo Company. Multi Choice Gripper Brochure [DB/OL]. [2017-11-11]. <https://www.festo.com.cn/group/zh/cms/10221.htm>.
- [3] BAO Guan-jun, XUN Yi, GAO Feng, et al. Flexible End-effector Based on Flexible Pneumatic Autuator And Its Grasping Model[J]. Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(10): 121—126.
- [4] YANG Qing-hua, RUAN Jian, BAO Guan-jun, et al. Research on Novel Flexible Pneumatic Actuator FPA[C]// Pro-ceedings of 2004 IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics. Singapore, 2004: 385—389.
- [5] 李增强, 章军, 刘光元. 苹果被动抓取柔性机械手结构与分析[J]. 包装工程, 2011, 32(15): 14—17.
LI Zeng-qiang, ZHANG Jun, LIU Guang-yuan. Apple Passively Grabs Structure And Analysis of Compliant Manipulator[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(15): 14—17.
- [6] 熊强, 章军, 王芳, 等. 抓取梯形包装盒的柔性机械手结构优化设计[J]. 包装工程, 2014, 35(11): 80—83.
XIONG Qiang, ZHANG Jun, WANG Fang, et al. Structure Optimal Design of Compliant Manipulator for Grasping Trapezoid Packing Box[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(11): 80—83.
- [7] 章军. 六关节三指苹果抓取机械手的自适应柔性分析[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 140—144.
ZHANG Jun. Adaptive Compliant Analysis of the Apple Grasping Manipulator with Six Joints and Three Fingers[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2010, 26(1): 140—144.
- [8] ZHANG Jun, LIU Guang-yuan. Self-adaption Grasping Force Analysis for an Apple Sorting Hand-claw with Robustness[J]. Robotica, 2014, 7: 1—15.
- [9] 陈春华, 章军, 田志伟, 等. 电动推杆驱动串联双铰链柔性机械手的状态分析[J]. 机械制造, 2015, 53(2): 31—34.
CHEN Chun-hua, ZHANG Jun, TIAN Zhi-wei, et al. State Analysis of Dual Hinge Compliant Manipulator Driven by Electric Push-rod[J]. Machinery Manufacturing, 2015, 53(2): 31—34.
- [10] 陈春华. 电动推杆驱柔性机械手结构与控制研究[D]. 无锡: 江南大学, 2015.
CHEN Chun-hua. Study on Structure and Control of the Flexible Manipulator Driven by Electric Push-rod[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2015.
- [11] 吴永宏, 李群明. 机械手夹持接触力及力封闭分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2009, 40(6): 1580—1586.
WU Yong-hong, LI Qun-ming. Analysis of Gripping Contact Force and Force-closure of Manipulator[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2009, 40(6): 1580—1586.
- [12] 黄华江. 实用化工计算机模拟—MATLAB 在化学工程中的应用[M]. 北京: 化学工业出版社教材出版中心, 2006.
HUANG Hua-jiang. Practical Chemical Computer Simulation-MATLAB in Chemical Engineering Application[M]. Beijing: Textbook Publishing Center of Chemical Industry Press, 2006.
- [13] 邓薇. MTALAB 函数速查手册[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2010.
DENG Wei. MTALAB Function Quick Search Manual[M]. Beijing: the People's Mail and Telecommunications Press, 2010.
- [14] 李娅. MATLAB R2015b 最优化计算[M]. 北京: 清华大学出版社, 2017.
LI Ya. MATLAB R2015b Optimization Calculation[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2017.
- [15] 百度文库. 摩擦系数表[DB/OL]. [2017-11-11]. <https://wenku.baidu.com/view/539b448fbceb19e8b8f6ba52.html>.
Baidu Library. Coefficient of Friction[DB/OL]. [2017-11-11]. <https://wenku.baidu.com/view/539b448fbceb19e8b8f6ba52.html>.