

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2019.06.001

复合驱动变掌机械手

史晓斐^{1,2}, 章军^{1,2}, 王城坡^{1,2}

(1. 江南大学机械工程学院, 江苏无锡 214122;
2. 江南大学江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏无锡 214122)

摘要:为满足轻工业中复杂对象(形状、尺寸变化范围大)的抓持需求,课题组设计了一种复合驱动变掌机械手。课题组介绍了该新型变掌机械手的工作原理;分析了机械手抓取圆柱体与长方体时的力学模型;研究了抓取圆柱体时半径与机械手指根节转动角度对接触力大小与接触点高度的影响。结果表明该机械手在理论上可以实现对宽度为0~200 mm的物体的可靠抓取,并可实现对接触力与接触点高度的精确控制。该机械手具有一定的实用价值,可应用于实际生产提高生产效率。

关键词:机械手;刚柔耦合手指;复合驱动;接触力分析;接触点高度

中图分类号:TP241;TH138.51 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2019)06-0001-06

Compound Drive Variable Palm Manipulator

SHI Xiaofei^{1,2}, ZHANG Jun^{1,2}, WANG Chengpo^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;
2. Jiangsu Province Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology,
Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

Abstract: In order to meet the demand of grasping complex objects (large range of shape and size variation) in light industry, a kind of compound drive variable palm manipulator was designed by the research group. The working principle of the manipulator was introduced. The mechanical model of manipulator grasping cylinder and cuboid was analyzed. The influences of the radius and the rotation angle of the root joint of the mechanical finger on the contact force and the height of contact point were discussed in detail. The results show that in theory the manipulator can reliably grasp objects with a width of 0 ~ 200 mm, and can accurately control contact force and contact point height. The manipulator has a certain practical value, and its application in actual production can improve production efficiency.

Keywords: manipulator; rigid-flexible coupling finger; compound drive; contact force analysis; contact point height

变掌机械手可以针对被抓物体的具体形状来改变手掌构型,具有很强的形状适应性^[1]。1998年Laval大学和MD ROBOTICS公司联合研制了Sarah机械手^[2],但该机械手很难满足被抓物体的接触力需求。北京软体机器人科技有限公司提出了一种新型软体机械手^[3],通过调节气压可以使机械手产生不同的工作构型来抓取物体,但该机械手在抓取物体时机械手柔性手指可能会发生侧弯,这会导致机械手只能依靠手指侧面接触物体。课题组提出的机械手具有步进电机

与气缸2种驱动;步进电机驱动机械手3个手指指根节的精确转动,笔形气缸驱动^[4-7]安装有扭弹簧的中指节、指尖节协调转动,且该机械手的形状、尺寸适应性好。

1 机械手结构与工作原理

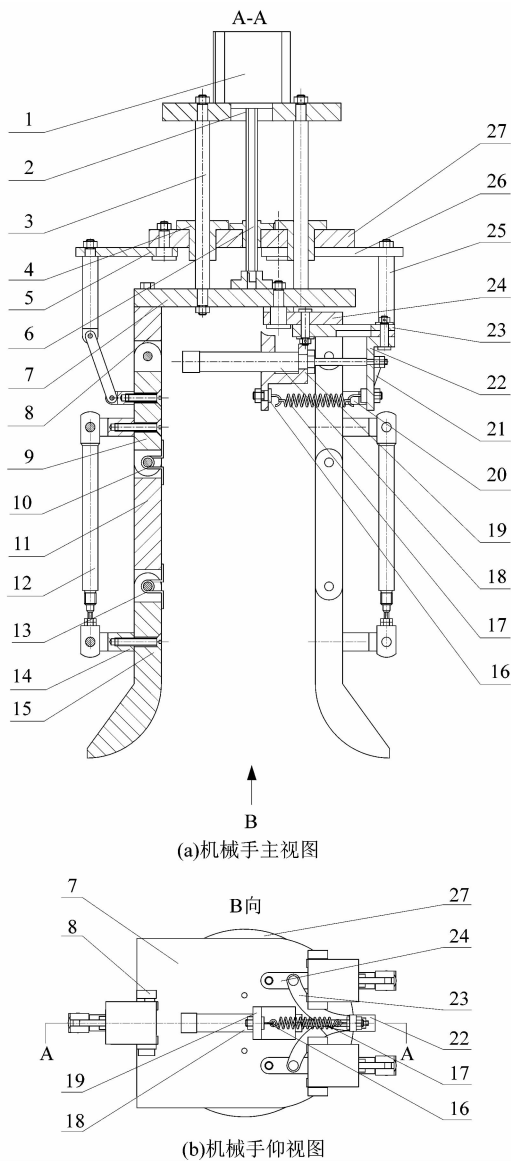
1.1 机械手结构设计

图1所示为复合驱动变掌机械手结构。机械手主要由指根节转动结构、手指转位结构与刚柔耦合手指结构3个部分组成。

收稿日期:2019-07-15;修回日期:2019-09-16

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)。

第一作者简介:史晓斐(1993),男,江苏无锡人,硕士研究生,主要从事欠驱动柔性机械手结构设计研究。E-mail:15006170855@163.com



1—丝杆步进电机;2—固定盘;3—支撑导柱;4—直线轴承;5—定手指推杆固定板;6—丝杆螺母;7—底盘;8—定手指座;9—指根节;10—小扭弹簧;11—中指节;12—手指驱动气缸;13—大扭弹簧;14—单耳座;15—指尖节;16—挂钩;17—拉弹簧;18—转位气缸;19—气缸安装座;20—短单耳座;21—二力杆;22—连接座;23—弯杆;24—动手指座;25—推杆;26—动手指推杆固定板;27—移动盘。

图 1 复合驱动变掌机械手结构

Figure 1 Structure of compound drive variable palm manipulator

指根节转动结构。2 根对称分布的支撑导柱 3 连接了固定盘 2 与底盘 7, 固定在移动盘 27 上的直线轴承 4 可在支撑导柱 3 上滑动; 丝杆步进电机 1 固定在固定盘 2 的上表面, 丝杆的末端固定在底盘 7 的带座轴承上; 丝杆螺母 6 将移动盘 27 与丝杆连接在一起。定手指推杆固定板 5 固定在移动盘 27 上, 动手指推杆

固定板 26 通过销轴与移动盘 27 连接, 推杆 25 的带螺纹端固定在推杆固定板上, 推杆 25 的另一端与二力杆 21 的首端通过销轴连接, 二力杆 21 的尾端与短单耳座 20 通过销轴连接, 短单耳座 20 固定在指根节 9 上。

手指转位结构。气缸安装座 19 通过螺钉固定在底盘 7 的下表面, 转位气缸 18 固定在气缸固定座 19 上, 并将转位气缸 18 的活塞杆前端固定在连接座 22 的侧面上, 两根弯杆 23 的首端通过销轴与连接座 22 的底面相连。弯杆 23 的尾端通过销轴与动手指座 24 连接; 拉弹簧 17 的两端分别通过挂钩 16 固定在气缸安装座 19 与连接座 22 上。

刚柔耦合手指结构。机械手共有 3 个手指, 其中 2 个为动手指, 1 个为定手指。每个手指均由 3 个指节组成。动手指座 24 通过销轴与底盘 7 连接, 定手指座 8 固定在底盘 7 上, 指根节 9 与手指座通过销轴连接, 中指节 11 与指根节 9 通过销轴连接, 指尖节 15 与中指节 11 通过销轴连接, 小扭弹簧 10 和大扭弹簧 13 分别安装在中指节 11、指尖节 15 的销轴上。手指驱动气缸 12 两端的 2 个双耳环连接件与 2 个单耳座 14 通过销轴连接, 2 个单耳座分别固定在指根节 9 与指尖节 15 上。

1.2 机械手工作原理

丝杆步进电机 1 的丝杆轴转动, 由于支撑导柱 3 的导向与限制作用, 丝杆螺母 6 带动移动盘 27 上下运动, 从而推杆 25 与二力杆 21 形成的连杆机构的运动改变了指根节 9 和手指座的夹角。丝杆步进电机 1 正转时移动盘 27 向下运动, 从而指根节 9 与手指座间的夹角增大, 丝杆电机 1 反转时指根节 9 与手指座间的夹角减小。

增大转位气缸 18 压力, 则气缸推力克服拉弹簧 17 的弹性力, 转位气缸 18 的活塞杆伸长带动对称连杆机构使机械手的 2 个动手指及其传动机构的转位角度变大; 减小转位气缸 18 压力, 2 个动手指及其传动机构的转位角度减小。

手指驱动气缸 12 的压力增大, 手指克服小扭弹簧 10 的弹性力, 中指节 11 开始转动; 手指驱动气缸 12 的压力继续增大, 手指克服小扭弹簧 10 与大扭弹簧 13 的弹性力, 则中指节 11 和指尖节 15 开始协调转动。

当丝杆步进电机 1 的转角、手指驱动气缸 12 与转位气缸 18 的压力达到控制值, 则机械手与物体间的接触力达到预定值。丝杆电机 1 断电时丝杆螺母机构自锁、同时手指驱动气缸 12、转位气缸 18 保压, 就可以保持接触力大小与接触点高度不变。

2 机械手抓取模型分析

2.1 机械手单个手指数学模型

机械手抓取物体的方式主要分为指尖捏取与包络抓取,课题组主要研究采用指尖捏取时机械手的性能。机械手单个手指数学模型^[8-9]如图2所示。图中A、B、C这3点分别为指根节、中指节与指尖节的铰链中心,将过A点的水平线定为Y轴,通过机械手手掌中心的垂线为Z轴。

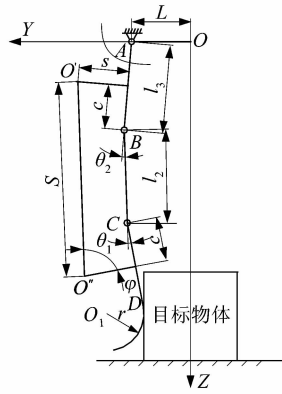


图2 单个手指数学模型

Figure 2 Single finger mathematical model

气缸安装中心距离 S 随机械手手指各关节的转动变化规律:

$$S = \left\{ [c \times \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + s \times \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + l_2 \times \cos(\theta_2 + \theta_3) + c \times \cos \theta_3 - s \times \sin \theta_3]^2 + [c \times \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) - s \times \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + l_2 \times \sin(\theta_2 + \theta_3) + c \times \sin \theta_3 + s \times \cos \theta_3]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

气缸轴线与单耳座中心线所成的夹角

$$\varphi = \arcsin \left(\frac{s \times \sin(\theta_1 + \theta_2) + c \times \cos(\theta_1 + \theta_2) + l_2 \times \cos \theta_1 + c}{s} \right)$$

大、小扭弹簧在机械手抓取物体时的变形协调方程:

$$k_1 \times (\theta_1 + \theta_{01}) = F \times s \times \sin \varphi - F \times c \times \cos \varphi - F_n \times L_1;$$

$$k_2 \times (\theta_2 + \theta_{02}) = F \times s \times \sin \varphi - F \times c \times \cos \varphi + F \times l_2 \times \sin(\varphi + \theta_1 - \frac{\pi}{2}) - F_n \times L_2。$$

根据机械手几何关系,可以得出接触力 F_n 对铰链中心 C 的力臂

$$L_1 = l_1 \times \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) - r \times \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)。$$

接触力 F_n 对铰链中心 B 的力臂

$$L_2 = l_1 \times \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) - r \times \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + l_2 \times \sin(\theta_2 + \theta_3)。$$

式中: L 为机械手抓取圆柱时手指座中心到 X 轴的垂直距离; l_3 为指根节长度; l_2 为中指节长度; l_1 为指尖节直线部分长度; r 为指尖节圆弧半径; s 为单耳座的高度; c 为单耳座中心距铰链中心的距离; R 为被抓圆柱的半径; θ_3 为指根节与手指座的相对转角; θ_2 为中指节与指根节的相对转角; θ_1 为指尖节与中指节的相对转角; k_1, k_2 分别为大、小扭弹簧的刚度; θ_{01} 与 θ_{02} 分别为大、小扭弹簧的预紧角; F 为手指驱动气缸的推力。

2.2 形状适应性分析

机械手抓取不同尺寸的圆柱体时机械手的抓取中心保持不变,机械手抓取不同尺寸的长方体时抓取中心也保持不变,但与抓取圆柱的抓取中心并不重合。并且机械手抓取长方体时,动手指与被抓物体的接触点和定手指与被抓物体的接触点不在同一抓取高度上。

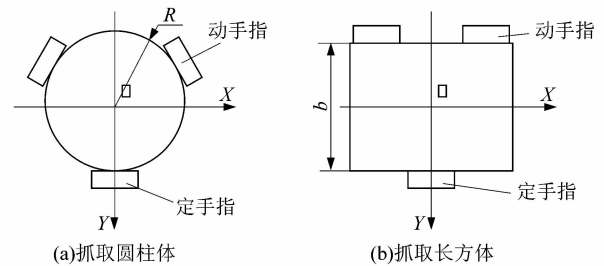


图3 机械手抓取圆柱和长方体在 XOY 平面上投影
Figure 3 Projection of manipulator grasping cylinder and cuboid on XOY plane

1) 当机械手3指均布抓取半径为 R 的圆柱时有:

①3个手指的接触力相同,且接触力方向指向圆心,即

$$F_{n1} = F_{n2};$$

②抓取圆柱体时,根据机械手的尺寸适应性有

$$R = l_1 \times \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + r \times \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + l_2 \times \cos(\theta_1 + \theta_3) + l_3 \times \cos \theta_3 + L - r。$$

2) 当机械手3指对抓取宽为 b 的长方体时有:

根据3指对抓力学模型,动手指的接触力为定手指的接触力的一半,并且动手指与定手指的接触力方向相反:

$$F_{n1} = 2 \times F_{n2}。$$

抓取长方体时,根据机械手的尺寸适应性有:

$$b/2 = l_1 \times \cos(\theta_{11} + \theta_{12} + \theta_3) + r \times \sin(\theta_{11} + \theta_{12} + \theta_3) + l_2 \times \cos(\theta_{12} + \theta_3) + l_3 \times \cos \theta_3 + L' - r;$$

$$b/2 = l_1 \times \cos(\theta_{21} + \theta_{22} + \theta_3) + r \times \sin(\theta_{21} + \theta_{22} + \theta_3) + l_2 \times \cos(\theta_{22} + \theta_3) + l_3 \times \cos \theta_3 + L' - r。$$

式中： θ_{12}, θ_{22} 分别为定手指、动手指的中指节相对指根节的转动角度； θ_{11}, θ_{21} 分别为定手指、动手指的指尖节相对中指节的转动角度； F_{n1}, F_{n2} 分别为定手指、动手指与被抓物体间的接触力； L' 为机械手抓取长方体时手指座中心到 X 轴的垂直距离。

3 机械手抓取性能分析

3.1 机械手尺寸参数

设计好机械手的机械结构后,需要确定机械手的尺寸参数。表 1 和表 2 所示分别为机械手与大、小扭弹簧的尺寸参数。

表 1 机械手手指部件尺寸参数

Table 1 Dimension parameters of manipulator

finger components				mm
指根节	中指节	指尖节	指尖	
长度 l_1	长度 l_2	直线长度 l_3	圆弧半径 r	
70	65	60	25	
单耳座	单耳座中心与铰链	气缸安装	活塞杆	
高度 s	中心的距离 c	中心长度 S	最大伸长量 h	
35	30	125	30	

表 2 扭弹簧参数

Table 2 Parameters of torsional spring

名称	刚度/ $(N \cdot m \cdot rad^{-1})$	预紧角/rad
大扭弹簧参数	0.298	0.666
小扭弹簧参数	0.128	0.159

3.2 机械手性能分析

如图 4~5 所示,在 MATLAB^[10-12] 中根据手指驱动气缸推力与中指节、指尖节相对转动角度之间的关系,并改变指根节的转动角度,得到了机械手定、动手指接触点三维图。从图中可以看出机械手的抓取范围很大,理论可以实现对直径为 0~200 mm 的圆柱体的可靠抓取。

$$\{ [c \times \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + s \times \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + l_2 \times \cos(\theta_2 + \theta_3) + c \times \cos \theta_3 - s \times \sin \theta_3]^2 + [c \times \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) - s \times \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + l_2 \times \sin(\theta_2 + \theta_3) + c \times \sin \theta_3 + s \times \cos \theta_3]^2 \}^{\frac{1}{2}} \leq 0.155。$$

计算气缸轴线的斜率

$$k = \frac{c \times \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) - s \times \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + l_2 \times \sin(\theta_2 + \theta_3) + c \times \sin \theta_3 + s \times \cos \theta_3}{c \times \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + s \times \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + l_2 \times \cos(\theta_2 + \theta_3) + c \times \cos \theta_3 - s \times \sin \theta_3}$$

手指驱动气缸外壁与机械手手指不能相互干涉:

$$0.006 - \left| k \times \frac{c \times \cos \theta_3 - s \times \sin \theta_3 - c \times \sin \theta_3 - 0.01 \times \sin(\theta_2 + \theta_3) - s \times \cos \theta_3}{(k^2 + 1)^{\frac{1}{2}}} \right| \leq 0;$$

$$0.006 - \left| \frac{k \times l_2 \times \cos(\theta_2 + \theta_3) + c \times \cos \theta_3 - s \times \sin \theta_3 - c \times \sin \theta_3 - s \times \cos \theta_3 - l_2 \times \sin(\theta_2 + \theta_3)}{(k^2 + 1)^{\frac{1}{2}}} \right| \leq 0。$$

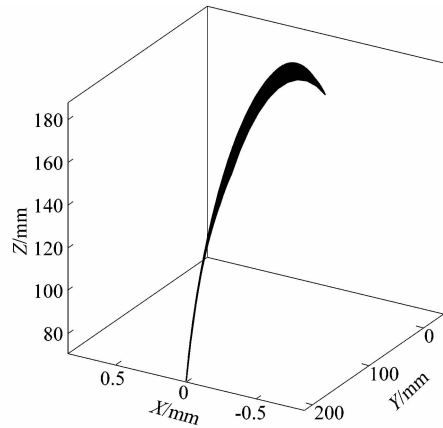


图 4 机械手右侧定手指接触点位置

Figure 4 Position of finger contact point on right side of manipulator

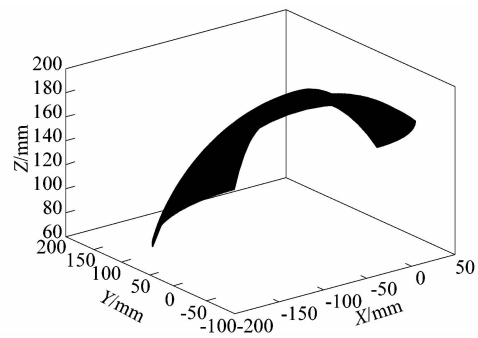


图 5 机械手左侧动手指接触点位置

Figure 5 Position of finger contact point on left side of manipulator

3.3 机械手抓取计算

机械手在抓取物体时需要满足力学与几何学方程,同时在机械手抓取物体的过程中各个零件不能发生干涉。

手指驱动气缸活塞杆的伸长量不能超过气缸的最大行程,即

在实际抓取物体时,机械手不但要适应被抓物体的尺寸,还需要满足被抓物体对接触力要求。因此需要对指根节转动角度变化和物体的尺寸变化对接触力的影响作具体的分析。机械手抓取圆柱体与长方体的抓取模型相似,因此课题组仅针对机械手抓取圆柱体作具体的分析。

将机械手指根节的转动角度定为 60° , 70° 和 80° 来抓取半径为 65 mm 的圆柱体,在 MATLAB 中设置手指驱动气缸的推力为 0 ~ 15 N,得到接触力与气缸推力之间的关系曲线如图 6 所示。

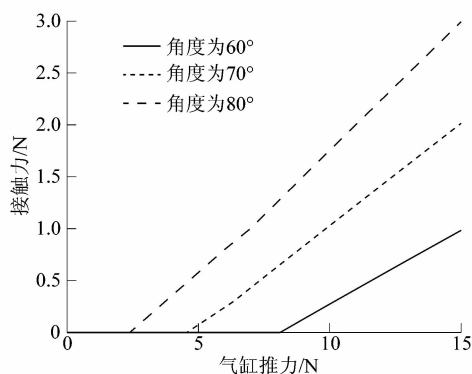


图 6 接触力变化曲线

Figure 6 Contact force variation curve

由图 6 可以得到以下结论:

- 1) 在抓取同一尺寸的圆柱体时,指根节的转动角度越大,机械手越早接触到物体;
- 2) 在机械手与圆柱体接触后接触力与气缸推力大致为线性关系,并且指根节转动角度越大,直线的斜率也就越大。

图 7 所示为机械手以不同的指根节转动角度抓取 65 mm 圆柱体时,接触点高度随手指驱动气缸推力的变化曲线。由图 7 可以得到以下结论:

- 1) 当机械手刚接触到物体时(接触力为 0),如果机械手的指尖节还没有开始转动,在机械手指尖节转动之前,机械手与圆柱体间的接触点保持不变;
- 2) 当圆柱体半径不变时,接触点移动的距离与指根节转动角度成正比例关系,当指根节转动角度为 80° 时,接触点高度变化仅为 1.803 mm。

机械手需要抓取不同尺寸的圆柱体,因此需要在机械手指根节转动角度不变时对物体的尺寸的适应性作具体的分析。当机械手在指根节为 60° 的时,机械手分别抓取半径为 65, 70 和 75 mm 的圆柱体。分别分析在抓取这 3 个尺寸的圆柱体时,机械手与被抓物体间的接触力变化规律。

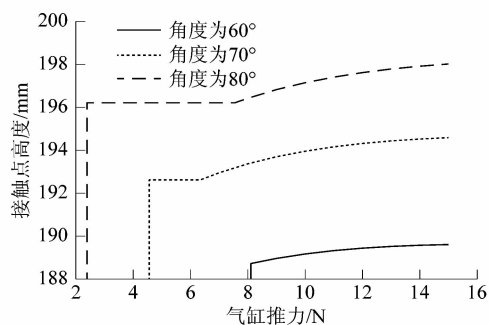


图 7 接触点高度变化曲线

Figure 7 Contact point height change curve

图 8 所示为机械手指根节以 60° 抓取不同尺寸的圆柱体时,接触力随手指驱动气缸推力的变化曲线。由图 8 可以得到以下结论:

- 1) 被抓物体半径越大,机械手越早接触到被抓物体;
- 2) 接触力与气缸的推力大致为线性的关系,并且 3 条曲线的斜率的大致相同。

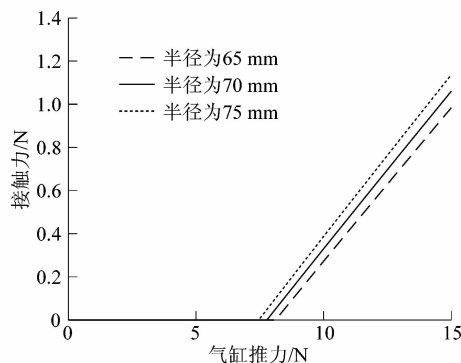


图 8 接触力变化曲线

Figure 8 Contact force variation curve

图 9 所示为机械手指根节转动角度为 60° 时,抓取不同尺寸的圆柱体时接触点高度随手指驱动气缸推力的变化曲线。

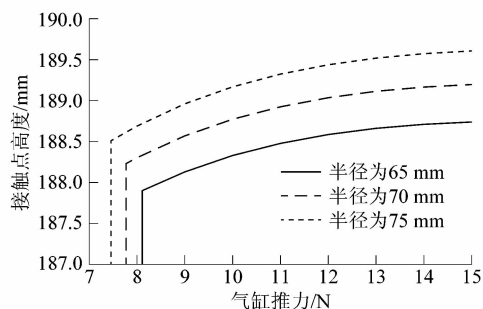


图 9 接触力高度变化曲线

Figure 9 Contact force height change curve

由图 9 可以得到以下结论:

1) 在驱动气缸的推力相同时,被抓物体半径越大,接触点高度越高。

2) 当指根节转动角度不变时,接触点移动距离与被抓物体半径成正比例关系。当被抓物体半径为 75 mm 时,接触点高度移动距离仅为 1.097 mm。

4 结语

为满足轻工业、食品行业中复杂对象的抓取需求,课题组设计了一种复合驱动的变掌机械手。分析了被抓物体为圆柱体和长方体时机械手抓取状态,通过计算实例验证了机械手在满足被抓物体的尺寸、形状的抓取需求的同时还可以通过调整手指驱动气缸的压力来精确控制机械手与被抓物体间的接触力大小与接触点高度。为了更好的抓取各种形状、尺寸的物体,进一步的研究可以使用步进电机作为手指转位的驱动源,提高机械手手指的转位精度。

参考文献:

[1] 李建海. 新型仿生柔性腕手可变腕掌构型研究[D]. 无锡: 江南大学, 2017:1-10.

[2] ULRICH N. Methods and apparatus for mechanically intelligent

grasping: US4957320 [P]. 1990-09-18.

[3] 中国新闻网. 中国科大研发柔性机器人手爪可抓豆腐纸张玻璃杯. [DB/OL]. (2018-12-11) [2019-07-05]. <http://www.chinanews.com/gn/2018/12-11/8698692.shtml>

[4] 史晓斐, 章军, 王城坡. 电-气复合驱动柔性机械手的设计与研究[J]. 包装工程, 2019, 40(3): 156-161.

[5] 刘光元. 一种新型机器人关节的结构与控制[D]. 无锡: 江南大学, 2013: 10-16.

[6] ZHANG Jun, LIU Guangyuan. Self-adaption grasping force analysis for an apple sorting hand-claw with robustness [J]. Robotica, 2016, 34(4): 723-737.

[7] 王洛智, 唐跃, 赵全玲. 新型抓胎机械手结构优化及动作分析[J]. 机电工程, 2017, 34(4): 361-365.

[8] 李秋苹, 章军, 崔军. 一种欠驱动柔性机械手的抓取力研究[J]. 轻工机械, 2018, 36(3): 14-17.

[9] 李秋苹, 章军, 崔军, 等. 柔性并联机构手指的机械手结构参数优化[J]. 包装工程, 2018, 39(11): 188-192.

[10] 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: 63-64.

[11] 邓薇. MATLAB 函数速查手册[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2010: 242-243.

[12] 周博, 薛世峰. MA12TLAB 工程与科学绘图[M]. 北京: 清华大学出版社, 2015: 54-65.

欢迎订阅 2020 年度《压力容器》杂志(月刊)

(邮局征订代号:26-10)

《压力容器》杂志是经国家新闻出版署正式认定的首批学术期刊,是中文核心期刊、中国科技核心期刊、RCCSE 中文核心学术期刊。《压力容器》杂志 1984 年创刊,由中国科学技术协会主管,中国机械工程学会压力容器分会主办。国内统一刊号:CN 34-1058/TH。国际标准刊号:ISSN 1001-4837。月刊,全年 96 元,国内外公开发售,邮局征订代号:26-10。

《压力容器》杂志是承压设备类技术型学术期刊,坚持学术性、实用性相结合的办刊方针;主要报道各类压力容器、管道及其附件的设计、制造、检验、使用和试验研究、标准化等相关技术;常设专题报告、试验研究、设计计算、标准规范、技术综述、安全分析、检验与修复、制造与安装、使用管理和经验交流等栏目;已被中国知网、万方数据、维普资讯、超星等国内主要期刊数据库全文收录。

需要订阅《压力容器》杂志的读者,请及时到当地邮局订阅,逾期可向压力容器杂志社索取订单。通信地址:安徽省合肥市长江西路 888 号,邮编:230031;联系电话:0551-65335515, 传真:0551-65313592; E-mail: ylrq1984@163.com, 网址: <http://www.chinapvt.com>。