

[新设备·新材料·新方法]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2014.03.014

# 通用梯形包装盒柔性抓持机械手结构

熊强, 章军, 朱飞成

(江南大学机械工程学院, 江苏无锡 214122)

**摘要:** 工业生产中为了满足抓取(如巧克力, 饼干)梯形的礼品包装盒的需要, 文中提出一种绳牵引驱动的串联双铰链柔性梯形包装盒机械手, 设计了适合抓取不同梯度与宽度的梯形礼品包装盒的机械手爪结构, 该结构能实现自适应抓取, 并且介绍了该手爪结构的驱动原理, 通过全局优化的方式得出两组重要扭弹簧的刚度系数与预紧角, 计算结果表明, 在设定的最大压力下, 该手爪能够满足对约 1.3 N 重的梯形包装盒任意位置的抓取。

**关键词:** 梯形包装盒; 柔性机械手; 绳牵引; 自适应抓取

中图分类号: TP241 文献标志码: A 文章编号: 1005-2895(2014)03-0056-05

## Structure Analysis of Universal Trapezoidal Package Flexible Grasping Manipulator

XIONG Qiang, ZHANG Jun, ZHU Feicheng

(School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

**Abstract:** In order to meet the crawl needs (such as chocolate, biscuits) trapezoid gift package in the industrial production, a rope traction drive tandem double hinge flexible manipulator trapezoidal package was proposed. The grab and width of the trapezoidal different gradients gift mechanical gripper structure of the package was designed, This structure could realize grasping with adaption, and introduced driving principle of the gripper structure, and also was drawn by two important torsion spring stiffness coefficient global optimization approach angle and pretension. The results show that under the maximum pressure setting the heavy gripper is able to meet 1.3 N trapezoidal package at any position.

**Key words:** trapezoidal package; flexible manipulator; rope traction; grasping with adaption

随着现代工业的高速发展和人们生活水平的不断提高, 商品货物的大量流通, 人们对于包装盒的需求也就不断扩大, 而商品包装盒在分拣抓取过程中不慎的话易导致包装盒压瘪等一系列问题, 所以为了保证商品的外观完整, 对商品的柔性抓取显得尤为重要。

目前对于机器人手指的研究主要是微电动机驱动的, 这样可以解决关节手指偏大的问题, 但这些传统的驱动技术在实际中具有一定的局限性, 因此很多研究者改变思路去研究一些先进的驱动技术<sup>[1]</sup>, 如: 压力电感应驱动器<sup>[2-4]</sup>, 形状记忆合金驱动器<sup>[5-6]</sup>、聚合材料人工肌肉驱动器<sup>[7]</sup>、磁致伸缩驱动器<sup>[8]</sup>及气动柔性驱动器<sup>[9]</sup>。

本文提出一种由气缸驱动绳牵引的关节构成的两

指机械手, 2 根手指对称分布, 该结构的手指由气缸充气状态时拉动牵引绳克服扭弹簧的阻力而伸直, 气缸放气时, 由于扭弹簧回复力的作用, 手指开始弯曲。手指垫有橡胶垫以适应对包装盒的柔性贴合, 良好的柔性适应性使得在保证成功抓取的同时又不会使包装盒的表面挤压过度<sup>[10-11]</sup>。工业中可以用于抓取糖果、巧克力、饼干等质量均匀的商品。

### 1 机械手的关节结构与气动原理

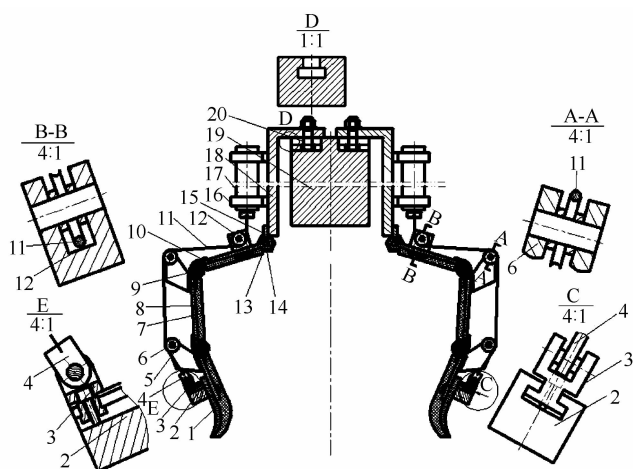
#### 1.1 机械手的关节结构与原理

如图 1 所示, 2 个机械手爪固定在厚度可换式机械手底座 19 上, 一边一个呈对称分布, 底座 19 上有一梯形槽, 底座 19 与底板用紧固螺母 20 连接, 可通过在底座上加刻度来调节手爪的不同角度, 螺母 20 在底座

收稿日期: 2013-12-18; 修回日期: 2013-12-26

作者简介: 熊强 (1988), 男, 江西南昌人, 硕士, 主要研究方向为仿生机械设计。E-mail: xiongqianglai@163.com

的 T 形槽内可以移动来调节手爪抓持的宽度,小型气缸 17 通过螺钉固定在底板 18 上,气缸 17 的下端固定有一螺母 16 连接牵引绳 11 的一端,牵引绳 11 通过导轮 5 与导轮支座 12 固定在小铰链 4 上,三活页串联铰链 8 的芯轴上装有 2 个刚度不同的扭弹簧 10,在手指内侧安装有圆弧形软橡胶垫 7,铰链支座 15、铰链芯轴 13 和三活页串联铰链 8 通过可调铰链螺母 16 进行锁紧,支座 3 可以沿着 T 形槽座 2 中的 T 形槽进行移动,然后通过内六角螺母进行锁定。当气缸 17 中充气后压力到达一定值之后,拉动牵引绳 11 克服扭弹簧的作用力,手指开始张开,放气时,扭弹簧在回复力的作用下开始弯曲开始抓取动作<sup>[12-13]</sup>。



1—手指端骨;2—T形槽座;3—小型铰链支座;4—小型铰链;5—导轮;6—导轮支架;7—软橡胶垫;8—三活页串联铰链;9—三活页串联铰链芯轴;10—扭弹簧;11—牵引绳;12—导轮支座;13—铰链芯轴;14—紧固螺母;15—铰链支座;16—固定螺母;17—小型气缸;18—手爪底板;19—手爪底座;20—紧固螺母

图 1 机械手机构示意图

Figure 1 Structure diagram of manipulator

### 1.2 机械手的气动原理图

图 2 所示的是气液复合驱动的原理图,初始时刻,电磁阀 3DT 连接外界空气,柱塞缸 7 处于最右端,当两位两通电磁阀 1 的 1DT 接通,电磁阀 5 的 2DT 未接通,气体通过电磁阀 1,然后流经不可调节流阀 2,最后压力气体进入柱塞缸 7 的右腔,柱塞缸左端的气压不断增加,当达到一定值时,柱塞缸开始向左移动,推动右侧的液压油流向气缸 3 的下侧,使得气缸活塞开始向上运动,带动牵引绳运动,克服铰链处扭弹簧的阻力进而关节机械手不断伸展,此时的机械手爪处于松弛状态,柱塞缸与气缸之间是液路,且柱塞缸与不可调节流阀连接紧凑,因此大大减少了低压气体的体积,机械手关节反应的时间也相应减少。

当需要抓取物体时,两位两通电磁阀 1DT 断开,电磁阀 5 接通,由于气缸的上部与空气接通,在关节扭弹簧的作用下,上部的气压将不断降低,关节不断弯曲,电磁阀的上端安装有出口节流阀 4,柱塞缸右端的气体通过电磁阀 5 和出口节流阀 4 排出,可以通过调节出口节流阀阻尼孔的大小来控制机械手爪弯曲的速度。

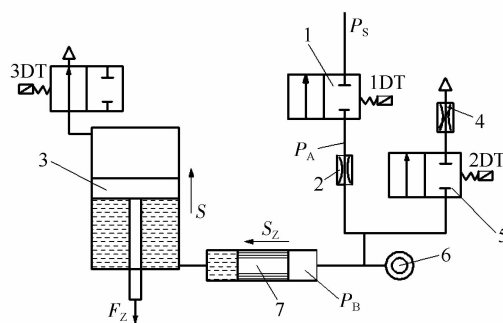


图 2 气动驱动原理图

Figure 2 Schematic diagram of pneumatic drive principle

### 2 机械手抓取包装盒接触时的状态

除扭弹簧外,假设其他材料都看作为刚体,如图 3 所示,在气缸拉动牵引绳的情况下,手爪无其他载荷且不抓取,铰链  $O_1$  和  $O_2$  点处的扭弹簧扭矩的平衡方程为

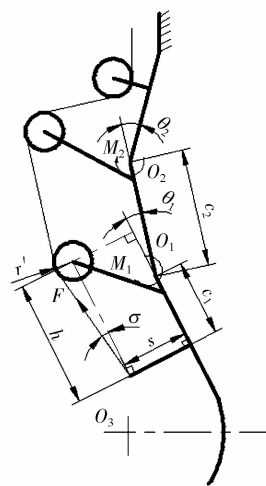


图 3 机械手静态受力分析

Figure 3 Static stress analysis of manipulator

$$M_1 = k_1(\theta_{o1} - \theta_1) = Fscos \sigma + Fc_1 \sin \sigma \quad (1)$$

$$M_2 = k_2(\theta_{o2} - \theta_2) = k_1(\theta_{o1} - \theta_1) + Fc_2 \sin(\sigma + \theta_1) \quad (2)$$

$$F = \pi(D^2 - d^2)p/4 \quad (3)$$

$$\tan \sigma = r'/h \quad (4)$$

其中: $M_1, M_2$ —铰链  $O_1, O_2$  处扭弹簧的扭矩;

- $k_1, k_2$ —铰链  $O_1, O_2$  处扭弹簧的刚度系数;
- $\theta_{o1}, \theta_{o2}$ —铰链  $O_1, O_2$  处扭弹簧的预紧角;
- $\theta_1, \theta_2$ —铰链  $O_1, O_2$  处扭弹簧的预紧角;
- $F$ —气缸拉动牵引绳的拉力;
- $\sigma$ —手指末端的直线段与牵引绳的夹角;
- $c_2$ —铰链中心  $O_2$  与铰链中心  $O_1$  距离;
- $c_1$ —铰链中心  $O_1$  与指尖骨与手指骨相切点的距离;
- $s$ —力  $F$  在导槽座上的作用点到手指内侧的距离;
- $D, d$ —气缸的内径、活塞杆的直径;
- $p$ —气缸的压力;
- $r'$ —导轮半径;
- $h$ —力  $F$  在导槽座上的作用点到导轮圆心的距离。

机械手结构抓取时简化图如图 4 所示,图 3 为从切面看抓取梯形包装盒  $a$  端和  $b$  端的截面的示意图,将梯形包装盒的形状尺寸的两个极限拿来研究, $b$  端宽度较小, $a$  端宽度较大,假设抓取同一类包装盒的大小尺寸和梯度是一致的,这时根据梯形盒的梯度,调节手爪底板上的螺母,根据底座上的刻度标来调节底板,使机械手爪转动的角度与包装盒一致,然后拧紧螺母。假定气压驱动抓取的包装盒质量不大,螺母拧紧后不会松动。不考虑橡胶垫的弹性变形,假设手指的圆弧段的宽度为  $e$ ,抓取梯形包装盒时候应该为一条贴合包装盒的线段,属于线接触,截取手指圆弧段的中点作为研究对象。

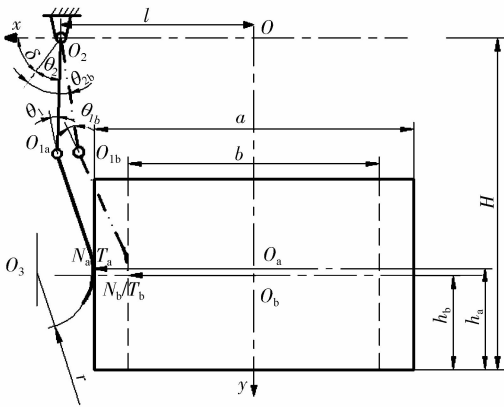


图 4 机械手抓取包装盒的示意图

Figure 4 Status diagram of manipulator when grasping the package

如图 4 所示建立坐标系,包装盒截面为矩形, $l$  是铰链中心  $O_2$  与手爪中心  $O$  的距离, $\delta$  为活页铰链安装手指的倾角, $c_2$  为铰链中心  $O_2$  与铰链中心  $O_1$  距离, $c_1$  为铰链中心  $O_1$  与手指端骨与手指骨相切点的距离, $T_a$  和  $T_b$  为接触点。 $a$  和  $b$  为抓取点处梯形包装盒的大小

宽度, $O_b$  为截面矩形的中心, $H$  是  $O$  与底面的高度距离, $h_b$  是抓取梯形盒窄端时抓取点到底面的竖直高度, $h_a$  是抓取梯形盒宽端时抓取点到底面的竖直高度, $N_a$  和  $N_b$  分别为抓取点处的抓持力。手指末端圆弧的圆心是  $O_3$ ,且半径为  $r$ 。

由如图的已知条件,可以得出几个点的位置关系, $O_a, O_b, O_1, O_3$  点的坐标分别为  $[0, H - h_a], [0, H - h_b], [l + c_2 \cos(\delta + \theta_2), c_2 \sin(\delta + \theta_2)], [l + c_2 \cos(\delta + \theta_2) + c_1 \cos(\delta + \theta_1 + \theta_2) + r \sin(\delta + \theta_1 + \theta_2), c_2 \sin(\delta + \theta_2) + c_1 \sin(\delta + \theta_1 + \theta_2) - r \cos(\delta + \theta_1 + \theta_2)]$ 。由几何关系可知,当抓取  $a$  端的位置时,直线  $O_3$  和  $O_a$  是一条水平线, $O_a$  和  $O_3$  的纵坐标相等

$$y_{O_3} = y_{O_a}$$

$$c_2 \sin(\delta + \theta_2) + c_1 \sin(\delta + \theta_1 + \theta_2) - r \cos(\delta + \theta_1 + \theta_2) = H - h_a \quad (5)$$

同样由几何关系可知,抓持力  $N$  对  $O_1$  点的力臂为

$$L_1 = H - h_a - c_2 \sin(\delta + \theta_2) \quad (6)$$

抓持力  $N$  对  $O_2$  点的力臂为

$$L = H - h_a \quad (7)$$

根据几何关系, $O_3$  点的横坐标即为指尖半径  $r$  与包装盒一半宽度  $a/2$  之和

$$X_{O_3} = r + a/2 \quad (8)$$

式中,

$$X_{O_3} = l + c_2 \cos(\delta + \theta_2) + c_1 \cos(\delta + \theta_1 + \theta_2) + r \sin(\delta + \theta_1 + \theta_2) \quad (9)$$

当抓取梯形盒的时候,抓取力为  $N$  时,铰链  $O_1$  点和  $O_2$  点处扭矩的平衡方程

$$k_1(\theta_{o1} - \theta_1) = NL_1 \quad (10)$$

$$k_2(\theta_{o2} - \theta_2) = NL \quad (11)$$

此时取抓持力  $N = 4 \text{ N}$ ,机械手结构的相关尺寸参数给定时,联立方程(5)~(9)式,算出  $\theta_1, \theta_2, L_1$ 。将所得的结果代入(10)和(11)式中可得抓取包装盒  $a$  端时的平衡方程。当抓取  $b$  端时,抓取接触点离水平面的高度变为  $h_b$ ,手指铰链处弯曲的角度为  $\theta_{1b}, \theta_{2b}$ ,代入(5)~(9)式中算出  $\theta_{1b}, \theta_{2b}, L_{1b}$ ,然后代入(10)和(11)式中,可得抓取包装盒  $b$  端时的平衡方程。

### 3 算例

#### 3.1 结构参数的选定与弹簧参数的优化

梯形包装盒尺寸为: $a = 0.094 \text{ m}, b = 0.054 \text{ m}, h_a = 0.034 \text{ m}, h_b = 0.033 \text{ m}$ 。手指尺寸为: $H = 0.104 \text{ m}, l = 0.062 \text{ m}, c_1 = 0.033 \text{ m}, c_2 = 0.031 \text{ m}, r = 0.025 \text{ m}, \delta = 5/12$ ,假设抓取某包装盒  $a$  端的力  $N_a = 4 \text{ N}$ 。

根据已知参数代入方程(5),(8),(9),得

$$0.031 \sin(\delta + \theta_2) + 0.033 \sin(\delta + \theta_1 + \theta_2) - 0.025 \cos(\delta + \theta_1 + \theta_2) = 0.07 \quad (12)$$

$$0.062 + 0.031 \cos(\delta + \theta_2) + 0.033 \cos(\delta + \theta_1 + \theta_2) + 0.025 \sin(\delta + \theta_1 + \theta_2) = 0.072 \quad (13)$$

联立(12),(13)可得:  $\theta_1 = 0.210768$ ,  $\theta_2 = 0.370613$ , 将  $\theta_1, \theta_2$  代入(6)中得  $L_1 = 0.0391833$ , 再将它们代入(10),(11)中,有

$$k_1(\theta_{o1} - 0.210768) = 0.156733 \quad (14)$$

$$k_2(\theta_{o2} - 0.370613) = 0.28 \quad (15)$$

相同的抓取包装盒  $b$  端时,将  $\theta_{1b}, \theta_{2b}, h_b, b$  替代方程(5)~(9)中算出  $\theta_{1b} = 0.367114$ ,  $\theta_{2b} = 0.562663$ ,  $L_{1b} = 0.0413925$ , 将它们代入(10),(11)中,有

$$k_1(\theta_{o1} - 0.367114) = 0.0413925 N_b \quad (16)$$

$$k_2(\theta_{o2} - 0.562663) = 0.071 N_b \quad (17)$$

优化的变量有:  $k_1, k_2, \theta_{o1}, \theta_{o2}$ 。

为使扭弹簧的预紧力不至于过大,将预紧角设置为小于  $\pi$ , 上述约束的数学表达式

$0.367114 < \theta_{o1} < \pi$ ,  $0.562663 < \theta_{o2} < \pi$ ,  $k_1 > 0.0534774$ ,  $k_2 > 0.101047$ , 且  $N_b < 4$ , 以  $\min(4 - N_b)$  为目标优化函数,借助 MATLAB 中的 fmincon 函数进行优化分析,编写程序得出优化结果。

弹簧参数:  $k_1 = 0.2312 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{rad}$ ,  $\theta_{o1} = 1.5815 \text{ rad}$ ,  $k_2 = 0.1114 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{rad}$ ,  $\theta_{o2} = 1.6171 \text{ rad}$ , 抓取力  $N_b = 3.3656 \text{ N}$ 。

### 3.2 抓取梯形包装盒的临界值

如图5所示,考虑到两指在抓取梯形包装盒任意位置时可能会造成包装盒的翻转,在实际运用中对能抓取多重的包装盒也要加以分析,手指的宽度为  $e$ , 手指抓取的摩擦力  $F_\mu$ , 梯形包装盒的重心为  $y_c$ , 当梯形包装盒传送过来的时候,  $b'$  端设置一个感应挡板,控制机械手可以在  $a'$  和  $b'$  之间任意位置抓取。

当手指抓取  $b$  端顶部的时候,满足包装盒不翻转的方程式为

$$2\mu N_b(e/2) \cos \alpha \geq mg(Y - y_c) \quad (18)$$

随着手指抓取点向重心方向移动未超过包装盒重心位置时,等式左端  $N$  逐渐增大,等式右端重力的力矩逐渐减小,可知手指在贴合  $b$  端顶部时,此时能抓取的包装盒质量最小。

当抓取  $a$  端底部时候,满足包装盒不翻转的方程式为

$$2\mu N_a(e/2) \cos \alpha \geq mgy_c \quad (19)$$

因为手爪是被动抓取,手爪在  $b$  端时抓取开度最小,扭弹簧回复力最小,所以抓取力  $N_b$  最小。随着手

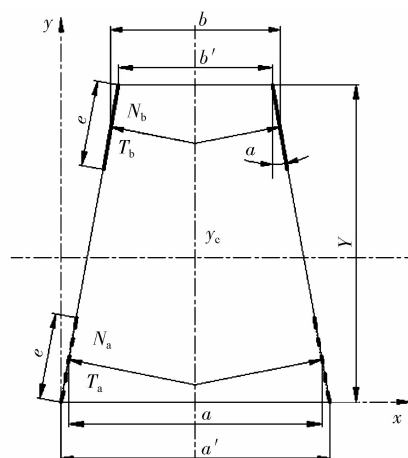


图5 机械手抓取包装盒时的平面示意图

Figure 5 Plan sketch of manipulator when grasping the package

指抓持点朝着重心的方向未到达重心位置时,等式左端  $N$  逐渐减小,但始终  $N > N_b$ , 梯形盒  $a$  端宽,重心靠近  $a$  端,所以等式右端  $y_c < (Y - y_c)$ , 因此(18)式中抓取的质量最小,也就是说要满足抓取包装盒任意位置不翻转,必须使

$$mg \leq 2\mu N_b(e/2) \cos \alpha / (Y - y_c) \quad (20)$$

根据梯形重心公式

$y = Y(2b' + a') / 3(b' + a')$ , 假设参数  $\mu = 0.8$ ,  $e = 0.03 \text{ m}$ ,  $Y = 0.110 \text{ m}$ , 可得  $y_c = 0.048715 \text{ m}$ , 算出  $mg \leq 1.29675 \text{ N}$ 。

### 4 结语

该柔性机械手结构简单,控制方便,成本低廉,针对不同梯度的梯形包装盒来调节机械手的角度都能实现抓取,而且手爪可以在底座上横向移动以满足不同宽度的被抓取物,结合气液复合驱动系统,使得关节运动时反应时间更短,角速度震动幅度减少,通过气缸带动牵引绳使手爪张开,抓取时牵引绳没有拉力,依靠扭弹簧的扭矩来抓取包装盒,假定某包装盒最大承受压力为  $4 \text{ N}$ ,在保证平稳抓持的情况下,以  $\min(4 - N_b)$  为优化函数,得出来2组扭弹簧的刚度系数  $k_1$  和  $k_2$  与预紧角度  $\theta_{o1}$  和  $\theta_{o2}$ , 以及最小抓持力  $N_b = 3.3656 \text{ N}$ , 最后还计算了抓取力在抓取包装盒任意位置不翻转时所能承受的最大的重量  $mg \leq 1.29675 \text{ N}$ 。

### 参考文献:

- [1] 刘旭东. 气动安全柔性关节的设计及其在机械人手指中的应用研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2008.
- [2] 李东明, 孙宝元, 董维杰, 等. 压电双晶片执行器驱动位移模型研究[J]. 中国机械工程, 2003, 14(17): 1499 - 1501.