

## 基于气动柔性驱动器的侧摆关节特性

张立彬, 王志恒, 鲍官军, 钱少明, 杨庆华\*

(浙江工业大学特种装备制造与先进加工技术教育部重点实验室, 杭州 310032)

**摘 要:** 基于气动柔性驱动器 (FPA) 提出了一种新型的气动侧摆关节, 该关节用于农业机器人多指灵巧手设计。侧摆关节主要由两个 FPA 组成, 向两个 FPA 内腔中通入不同压力的压缩气体, 可以实现左右两个方向的侧摆运动。对单个 FPA 的自由端进行力平衡分析, 建立了侧摆关节静态模型, 并对模型进行简化。完成了侧摆关节静态特性试验, 试验结果与仿真曲线基本吻合, 验证了静态模型的正确性, 但存在一定误差 (最大静态误差为  $0.035 \text{ rad}$ ), 分析了误差原因; 对侧摆关节进行了动态特性试验, 试验结果表明对于不同的期望值角度阶跃信号, 侧摆关节开环阶跃响应时间大约是  $2 \text{ s}$  (稳态值的公差带  $\Delta=5\%$ )。该侧摆关节可以明显改善农业机器人灵巧手的工作空间, 进一步提高农业机器人灵巧手的适应性和灵活性。

**关键词:** 关节, 驱动器, 模型, 机器人, 多指灵巧手

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2009.08.013

中图分类号: TP242

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2009)-8-0071-07

张立彬, 王志恒, 鲍官军, 等. 基于气动柔性驱动器的侧摆关节特性[J]. 农业工程学报, 2009, 25(8): 71-77.

Zhang Libin, Wang Zhiheng, Bao Guanjun, et al. Characteristics of side-sway joint based on flexible pneumatic actuator[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(8): 71-77. (in Chinese with English abstract)

### 0 引言

随着机器人技术的不断进步, 机器人的应用领域不断扩大, 逐步从工业延伸到农业、医疗以及服务业领域中, 其操作对象也变得更加复杂化。由于空气的可压缩性好, 气动驱动器的柔顺性较好; 同时, 气动驱动器又具有结构简单、可直接驱动无需减速机构、动作灵活、对操作对象损伤较小等特点。因此, 近些年来, 对以气动驱动器为元件的气动关节研究不断增多, 较为有代表性的气动驱动关节如下: McKibben 气动驱动器 PMA<sup>[1-3]</sup>, 以及以 PMA 为基础设计的多种气动驱动关节; 日本东芝公司研制的 3 自由度气动球关节 FMA<sup>[4-5]</sup> (flexible microactuator)、日本冈山大学 NORITSUGU 等研制的旋转型柔性弯曲关节驱动器<sup>[6]</sup>、德国卡尔斯鲁厄计算机科学应用研究中心提出的柔性流体驱动器<sup>[7]</sup>以及江南大学机械工程学院章军等提出的基于弹性波壳伸缩的气动驱动器<sup>[8]</sup>。以上气动驱动关节在具体结构上各有特色, 均具有柔顺性好、动作平滑、噪声低、无污染等特点, 并已应用于有关各种机器人柔性多指手的设计中。

收稿日期: 2009-03-09 日期: 2009-05-25

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (009AA04Z209) 国家自然科学基金资助项目 (0575206); 浙江省科学基金资助项目 (Y1080485); 浙江省机械电子工程重中之重学科开放基金项目 (20090325)

作者简介: 张立彬 (1955—), 男, 浙江景宁人, 教授, 博士, 博士生导师, 中国农业工程学会会员 (E041200042S), 主要从事农业工程, 气动灵巧手技术, 机器人技术, 机电工程, 以及农业、轻工与食品加工设备的机电一体化技术的研究。杭州 浙江工业大学机械工程学院, 310032

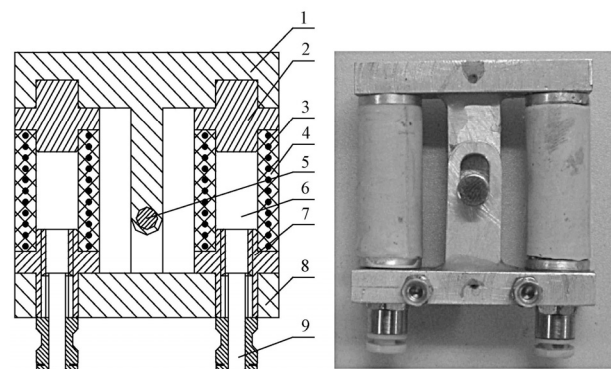
\*通信作者: 杨庆华 (1964—), 男, 博士, 教授, 从事机器人技术及应用、精密锻压技术等领域研究。杭州 浙江工业大学机械工程学院, 310032。

Email: robot@zjut.edu.cn

本文基于气动柔性驱动器 FPA (flexible pneumatic actuator)<sup>[9-11]</sup>设计了气动柔性侧摆关节, 该侧摆关节主要用于农业机器人多指灵巧手设计, 能够实现左右两个方向的侧摆运动, 驱动器 FPA 与关节本体一体化, 不需要外加驱动系统, 柔顺性好, 适应性强, 结构简单, 且便于实现小型化。

### 1 侧摆关节的结构原理

气动侧摆关节由上下两个 T 型活动构件、两个气动柔性驱动器 FPA 以及两个管接头组成, 结构如图 1 所示。上 T 型活动构件下端设有圆孔, 下 T 型活动构件上端设有腰形孔, 两个 T 型活动构件和销轴通过腰槽结构形成一个可轴向伸缩的转动铰链; 两个气动柔性驱动器 FPA 分别固定在两个活动构件上, 且左右对称分布; 两个管接头通过螺纹联接分别固定在两个 FPA 的前端盖上。



1、8.T 型连杆 2、7.FPA 端盖 3.FPA 内壁螺旋钢丝  
4.FPA 橡胶管 5.转动轴 6.FPA 9.管接头

图 1 气动侧摆关节

Fig.1 Side-sway joint based on flexible pneumatic actuator (FPA)

如图 1 所示,气动柔性驱动器 FPA 主要由两个端盖、橡胶管以及嵌在橡胶管内壁的螺旋弹簧组成。当压缩气体通过管接头通入 FPA 的内腔中, FPA 在气体压力以及螺旋弹簧的径向限制作用下,发生轴向伸长;当气体压力减小时, FPA 在橡胶管的回弹力作用下,恢复原状。

侧摆关节的工作原理如下:由于橡胶管不可压缩,侧摆关节工作前需通过管接头,向两个气动柔性驱动器 FPA 内腔中预通入相同压力的压缩空气,在等压气体压力的作用下,两个 FPA 发生相同的轴向伸长,从而推动上 T 型活动构件运动直至销轴与下 T 型活动构件上长孔上端接触为止;接着,改变两个气动柔性驱动器 FPA 的内腔气压,当左边 FPA 的内腔气压大于右边 FPA 的内腔气压时,左边 FPA 的伸长量将大于右边 FPA 的伸长量,侧摆关节向右侧摆,反之亦然;释放两个 FPA 内腔的压缩空气, FPA 在橡胶管和螺旋弹簧的回弹作用下,恢复原状,同时带动 T 型活动构件恢复到初始状态。

## 2 侧摆关节的静态特性分析

侧摆关节运动过程如图 2 所示,便于描述,笔者将侧摆关节运动时形变量大的 FPA 定义为长 FPA,形变量小的 FPA 定义为短 FPA。



图 2 侧摆关节的运动状态示意图  
Fig.2 Bending state of side-sway joint

### 2.1 侧摆关节的静态模型

分析建立侧摆关节的静态模型之前,假设如下:

1) 由于 FPA 橡胶管内螺旋弹簧的钢丝半径很小 (0.2 mm),刚度较小,且是螺旋密绕在橡胶管的管壁内,可以认为 FPA 伸长过程中,弹簧的弹力忽略不计,忽略其对橡胶弹性模量的影响;

2) FPA 橡胶管质地均匀,并且弹簧均匀处于橡胶管壁中间;

3) 大气压力与 FPA 内腔气体压力在端盖上的作用面积相等。

在假设条件下,侧摆关节运动时,两个 FPA 在活动构件的限制和铰链转动导向作用下,发生弧形形变。便于分析,将侧摆关节的受力模型简化如图 3 所示。

假设两个 FPA 的初始长度为  $l$  (mm);中心线间距为  $a$  (mm);侧摆预伸长量为  $x$  (mm);预伸长后,橡胶管长度为  $L=l+x$  (mm);销轴中心线到上下两个 T 型活动构件距离相同,为  $L/2$ 。由图 3 中的几何关系可得

$$R = \frac{L}{2 \tan \frac{1}{2} \theta} \quad (1)$$

$$L_l = (R + \frac{1}{2}a)\theta = (\frac{L}{2 \tan \frac{1}{2} \theta} + \frac{1}{2}a)\theta \quad (2)$$

$$L_s = (R - \frac{1}{2}a)\theta = (\frac{L}{2 \tan \frac{1}{2} \theta} - \frac{1}{2}a)\theta \quad (3)$$

式中:  $R$  —— 侧摆关节中心线弧的半径, mm;  $\theta$  —— 侧摆关节的侧摆角度, rad;  $L_l$  —— 长 FPA 的中心线弧的弧长, mm;  $L_s$  —— 短 FPA 的中心线弧的弧长, mm。

对长 FPA 的一端进行静力分析,其受力情况如图 3 所示,可得

$$F_{pl} - F_{atm} - F_{al} = P_l \pi r_0^2 - P_{atm} \pi r_0^2 - F_{al} = 0 \quad (4)$$

式中:  $F_{pl}$  —— 长 FPA 内腔气体压力, N;  $F_{atm}$  —— 大气压力, N;  $P_l$  —— 长 FPA 的内腔气体压强, MPa;  $P_{atm}$  —— 大气压强, MPa;  $r_0$  —— FPA 橡胶管的平均半径,即螺旋弹簧的半径, mm;  $F_{al}$  —— 长 FPA 橡胶管壳的弹性力。

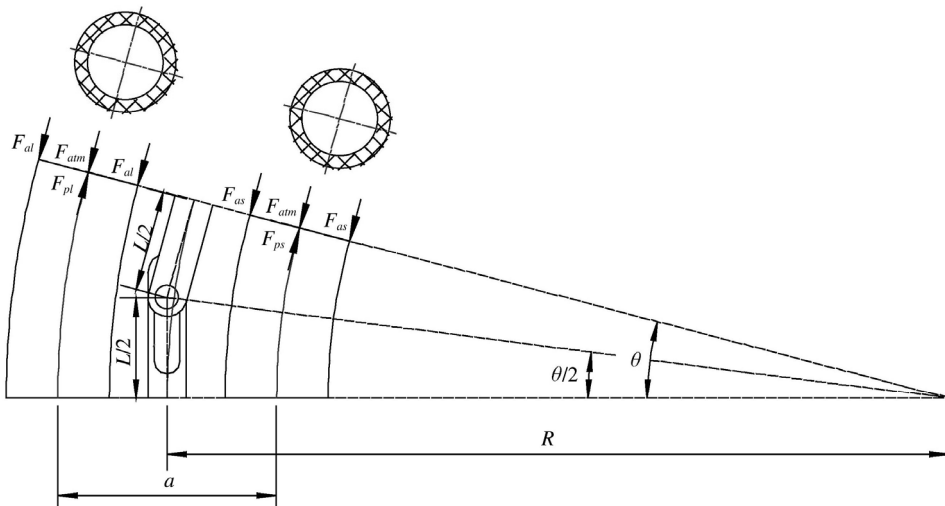


图 3 侧摆关节受力模型  
Fig.3 Force diagram of side-sway joint

长 FPA 橡胶管壳的弹性力为

$$F_{al} = \sigma_l A_l \quad (5)$$

侧摆关节发生弧形形变的 FPA，严格意义上，同一横截面积上橡胶管壳体壁厚以及应变不同；由于 FPA 变形过程中橡胶管平均半径不变<sup>[12]</sup>，且 FPA 的橡胶管壁厚较小（2 mm），我们忽略同一横截面积上壁厚变化，所以，可以认为长 FPA 橡胶管的平均应变为

$$\varepsilon_l = \frac{L_l - l}{l} \quad (6)$$

典型橡胶应变小于 100% 时，其应力-应变曲线是线性的，满足胡克定律<sup>[13]</sup>，长 FPA 的橡胶管壳体平均应力为：

$$\sigma_l = E \varepsilon_l \quad (7)$$

式中  $E$ ——FPA 橡胶管的弹性模量，MPa。

长 FPA 橡胶管的横截面积为

$$A_l = \pi(r_0 + \frac{1}{2})^2 - \pi(r_0 - \frac{1}{2})^2 = 2\pi r_0 t_l \quad (8)$$

长 FPA 橡胶管的初始壁厚为  $t_0$ （mm）；伸长后壁厚为  $t_l$ （mm）；由材料等体积原理可得

$$t_l = \frac{l}{L_l} t_0 \quad (9)$$

将式（9）代入式（8），得到

$$A_l = 2\pi r_0 \frac{l}{L_l} t_0 \quad (10)$$

将式（10）、（6）以及（7）代入式（5），可以得到

$$F_{al} = 2\pi E r_0 t_0 \frac{L_l - l}{L_l} \quad (11)$$

将式（11）代入式（4），可以推导出

$$L_l = \frac{2Et_0 l}{2Et_0 - (P_l - P_{atm})r_0} \quad (12)$$

将式（12）代入式（2），可以得到

$$\left(\frac{L}{2 \tan \frac{1}{2} \theta} + \frac{1}{2} a\right) \theta = \frac{2Et_0 l}{2Et_0 - (p_l - p_{atm})r_0} \quad (13)$$

对于短 FPA，同理可得：

$$\left(\frac{L}{2 \tan \frac{1}{2} \theta} - \frac{1}{2} a\right) \theta = \frac{2Et_0 l}{2Et_0 - (p_s - p_{atm})r_0} \quad (14)$$

式中  $P_s$ ——短 FPA 的内腔气体压强，MPa。

侧摆关节预充气体压强为

$$P_y = \frac{2Et_0 x}{r_0 L} + P_{atm} \quad (15)$$

式（13）与式（14）是气动柔性侧摆关节的静态模型，反映了侧摆关节的侧摆角度  $\theta$ （ $\theta \neq 0$ ）与两个 FPA 内腔气压  $P_l$ 、 $P_s$  的关系。

## 2.2 侧摆关节静态模型的特性分析

由式（13）、式（14）可知，侧摆关节的结构参数确定后，侧摆角度的大小仅取决于侧摆关节两个 FPA 内腔气压的大小，即：侧摆角度  $\theta$  是长 FPA 内腔气压  $P_l$  以及短 FPA 内腔气压  $P_s$  的函数，可以表示为：

$$\begin{cases} \theta = f(P_l) \\ \theta = f(P_s) \end{cases} \quad (16)$$

通过仿真试验可以得到  $\theta$ — $P_l$ 、 $P_s$  的曲线，如图 4 所示，仿真参数见表 1 所示。

表 1 侧摆关节静态特性分析仿真参数  
Table 1 Parameters of side-sway joint static simulation

参 数	参数值
FPA 橡胶管原长 $l$ /mm	19
预伸长距离 $x$ /mm	6
橡胶管的弹性模量 $E$ /MPa	2
两个 FPA 轴线的距离 $a$ /mm	32
橡胶管的初始壁厚 $t_0$ /mm	2
橡胶管平均半径 $r_0$ /mm	5.25
大气压力 $P_{atm}$ /MPa	0.1

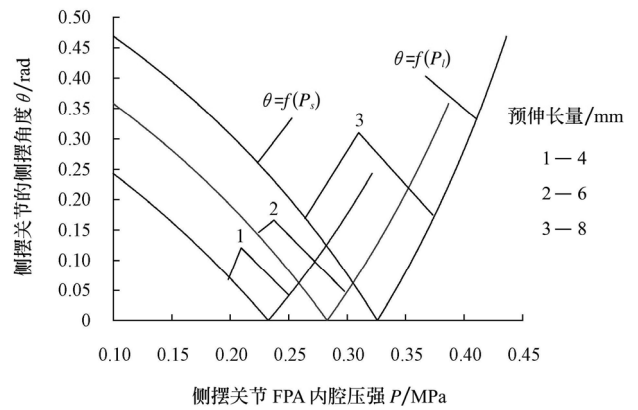


图 4 侧摆角度与两个 FPA 内腔气体压强的关系

Fig.4 Curve of bending angle and pressure inside two FPAs

从图 4 中的仿真曲线可以看出：侧摆关节两个 FPA 内腔预充气体压强值，即曲线与  $x$  轴交点的横坐标值；其他参数不变的情况下，侧摆关节最大的侧摆角度即曲线  $\theta=f(P_s)$  与  $y$  轴交点的纵坐标值，取决于两个 FPA 内腔预充气体的压强；侧摆运动时，随着侧摆角度的增大，短 FPA 的内腔气体压强减小，长 FPA 的内腔气体压强增大，但均不是线性关系。

下面研究对侧摆关节模型有重要影响的两个结构参数。

1) 侧摆关节两个 FPA 轴线距离  $a$  对侧摆关节静态特性影响

由式（13）、式（14）和表 1 中的仿真参数，绘制侧摆关节的侧摆角度  $\theta$  与两个 FPA 轴线距离  $a$  关系仿真曲线，如图 5 所示。可以得到：当 FPA 内腔压强不变时，侧摆关节的侧摆角度，随着两个 FPA 轴线的距离增大而减小，但不是线性关系。

2) 侧摆关节两个 FPA 原始长度  $l$  对侧摆关节静态特性影响

由式（13）、式（14）和表 1 中的仿真参数，绘制侧摆角度  $\theta$  与两个 FPA 原长  $l$  的关系仿真曲线，如图 6 所

示。可以得到：当侧摆关节两个 FPA 的预伸长量  $x$  一定以及内腔压强不变时，侧摆关节的侧摆角度随着 FPA 的原长增大而增大，且非常接近线性关系。

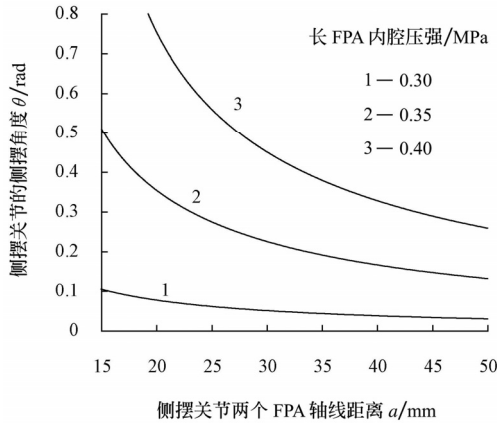


图 5 侧摆角度与两个 FPA 轴线距离的关系

Fig.5 Curve of bending angle and distance of axis of two FPAs

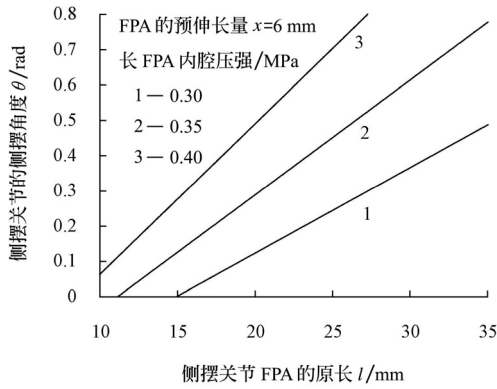


图 6 侧摆角度与 FPA 原长的关系

Fig.6 Curve of bending angle and initial length of FPAs

### 2.3 侧摆关节静态模型简化

过于复杂的数学模型，不利于实际应用，需要对侧摆关节的静态模型进行简化。对式(13)与式(14)中  $\tan \frac{\theta}{2}$  进行泰勒级数展开，可得

$$\tan \frac{\theta}{2} = \frac{\theta}{2} + \frac{1}{3} \left( \frac{\theta}{2} \right)^3 + \frac{2}{15} \left( \frac{\theta}{2} \right)^5 \quad (17)$$

且式(17)的收敛半径为  $\theta$  的全部定义域。

将  $\tan \frac{\theta}{2}$  的二次幂级数  $\tan \frac{\theta}{2} \approx \frac{\theta}{2}$  代入式(13)、式(14)，化简得到：

$$\theta = \frac{2}{a} \left( \frac{2Et_0l}{2Et_0 - (p_i - p_{atm})r_0} - L \right) \quad (18)$$

$$\theta = \frac{2}{a} \left( L - \frac{2Et_0l}{2Et_0 - (p_s - p_{atm})r_0} \right) \quad (19)$$

根据表 1 中的仿真参数，绘制简化模型的仿真曲线，同时，将简化模型的仿真曲线与实际理论模型仿真曲线进行比较，如图 7 所示。可以看到：当侧摆角度较小时，简化模型与理论模型曲线近乎重合；按照表 1 参数，当

侧摆关节达到最大侧摆角度时，简化模型所得 FPA 内腔气压值与实际理论值相比较，误差小于 3%。通过分析，当侧摆角度较小时，侧摆关节的静态模型可以简化为式(18)和式(19)。

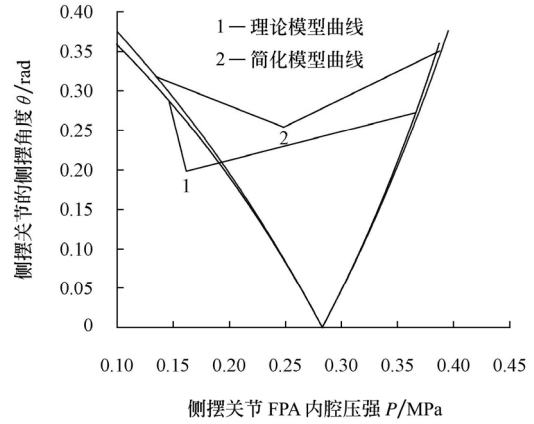


图 7 简化模型曲线与实际理论模型曲线对比

Fig.7 Curve of comparison of simplified model and theoretical model

作者提出的侧摆关节初衷是用于设计机器人多指灵巧手，根据人手结构，侧摆关节的侧摆角度范围是  $-0.175 \sim 0.175$  rad ( $-10^\circ \sim 10^\circ$ )，故可以使用简化模型。

### 3 侧摆关节的特性试验与分析

#### 3.1 试验原理

侧摆关节特性测试试验原理如图 8 所示，试验用的侧摆关节参数如表 2 所示。本试验系统原理如下：PCL-812PG 数据采集卡通过两路 D/A 输出控制电-气压力比例阀的电压信号，从而改变侧摆关节两个 FPA 的内腔气压，实现其侧摆运动；同时 PCL-812PG 通过两路 A/D 转换通道对电-气压力比例阀压力反馈信号进行检测；侧

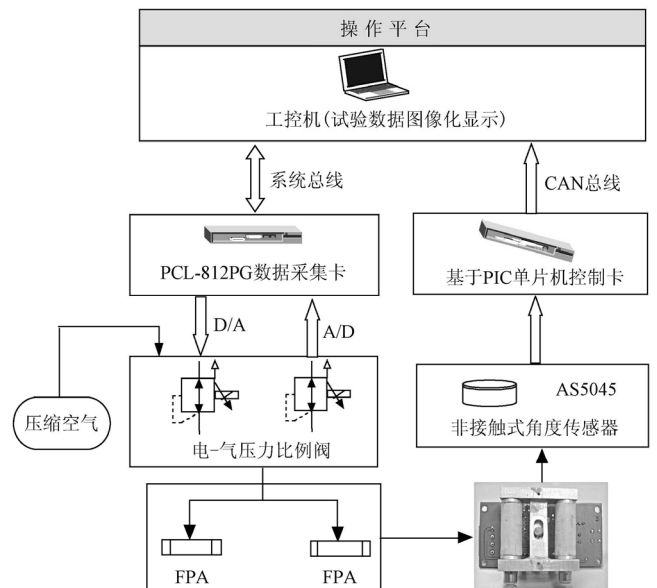


图 8 侧摆关节试验原理

Fig.8 Experimental principle diagram of side-sway joint

摆角度通过非接触式角度传感器 AS5045 测量；测量的角度值通过单片机系统以 CAN 总线方式传输给工控机；上位机图形化软件采用 delphi7 编写。

表 2 试验用侧摆关节结构参数

Table 2 Structure parameters of side-sway joint for experiment

参 数	参数值
FPA 橡胶管原长 $l/\text{mm}$	23
预伸长距离 $x/\text{mm}$	5
橡胶管的弹性模量 $E/\text{MPa}$	2.94
两个 FPA 轴线的距离 $a/\text{mm}$	32
橡胶管的初始壁厚 $t_0/\text{mm}$	2
橡胶管平均半径 $r_0/\text{mm}$	10.5

试验系统中采用的角位移传感器 AS5045 是一种非接触式磁旋转编码器<sup>[14]</sup>，可以精确测量  $360^\circ$ 范围内的角度，分辨率达  $0.0879^\circ$ 。测量角度时，只需要将一小块圆形双极磁铁固定在侧摆关节的转动销轴一端，同时将该磁铁放置在 AS5045 芯片中心的上方即可。角位移传感器与侧摆关节不接触，二者之间无阻尼作用，可以忽略传感器对侧摆关节本身的影响，故试验数据可以更加确切地反映侧摆关节的特性。

### 3.2 静态特性试验

向侧摆关节的两个 FPA 的内腔充入压缩空气，测量关节的侧摆角度，图 9 所示为一组试验结果和仿真曲线。

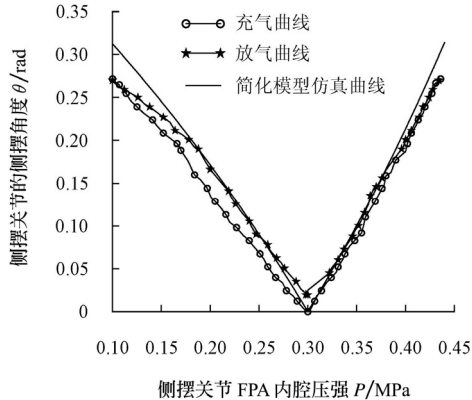


图 9 侧摆关节静态试验与仿真

Fig.9 Curve of static experimental results and simulation

从图 9 可以得到：

1) 试验曲线和仿真曲线基本吻合，但是存在一定的误差，最大绝对误差为  $0.035 \text{ rad}$ ，最大相对偏差为  $10.9\%$ ，说明所建立的数学模型基本正确，可以反映侧摆关节的静态特性；

2) 侧摆关节 FPA 充气过程的试验曲线和放气过程的试验曲线存在明显的滞环，这是由构成 FPA 的橡胶管的黏滞性所造成的；

3) 在侧摆运动过程中，侧摆关节长 FPA 的试验曲线与仿真结果更接近，而短 FPA 的试验曲线和仿真曲线存在的误差大一些，造成这种结果的原因是：侧摆关节运动时，两个 FPA 存在运动耦合的问题，为了避免两个 FPA

运动干涉，试验中人为地减小了短 FPA 的内腔压强；

4) 静态试验测得的角度值比仿真结果的角度值要小，且随着角度的增加，误差增大。其原因一方面是橡胶管的黏滞性，侧摆关节转轴摩擦，以及 FPA 的制作缺陷和径向膨胀等因素，而这些因素在理论建模时都是被忽略的；另一方面由于简化理论模型和实际理论模型存在一定的误差。

### 3.3 动态特性试验

采用上述试验原理，试验所用侧摆关节的参数如表 2 所示。根据侧摆关节简化理论模型计算两个 FPA 分别所需的压缩气体压力，通过工控机向侧摆关节分别发送期望值为  $0.262$ 、 $0.217$  和  $0.149 \text{ rad}$  的阶跃信号，试验测量的开环阶跃响应曲线如图 10 所示。

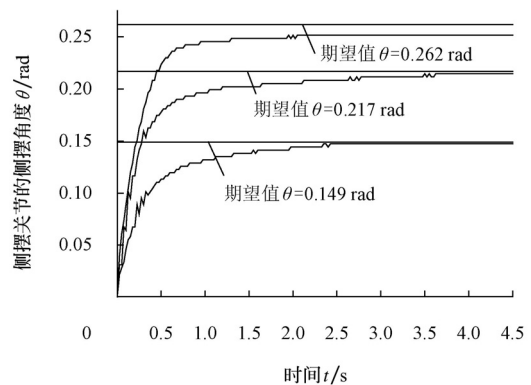


图 10 侧摆关节开环阶跃响应曲线

Fig.10 Step response curve of side-sway joint

从图 10 中可以得到：

1) 开环控制情况下，侧摆关节对于阶跃信号的响应没有明显的振荡和超调，主要是因为构成 FPA 的主要材料是橡胶，由于橡胶的黏滞性使得侧摆关节阻尼系数较大，试验验证试验系统是个过阻尼系统；

2) 由于是过阻尼系统以及气体具有可压缩性，侧摆关节的响应速度较慢。当稳态值的公差带  $\Delta=5\%$  时，对于输入不同的期望值角度的阶跃信号，侧摆关节达到稳态的时间为  $2 \text{ s}$  左右；本试验系统采用的 SMC 生产的电-气压力比例阀，型号为 ITV00503，空载响应时间小于  $0.1 \text{ s}$ ，故可以忽略电-气压力比例阀对试验系统动态响应的影响；

3) 图 10 中可以看到对于不同期望值角度的阶跃信号，侧摆关节的响应速度不同，输入的期望值越大，侧摆关节的响应速度越快，这是因为期望值角度越大，侧摆关节中两个 FPA 的内腔气压差越大；

4) 图 10 中 3 组动态响应曲线中，最大的稳态误差为  $0.015 \text{ rad}$ ，最大相对偏差为  $5.7\%$ ，随着期望值角度增大，稳态误差增大，这和静态特性试验结果相吻合。误差的原因在前面已经做了分析。

## 4 预期应用前景

20 世纪 70 年代以来，国内外的科研机构相继研制出了多种农业机器人多指灵巧手，其关节的驱动方式主要有两种<sup>[15-19]</sup>：电机驱动和气动人工肌肉 PMA<sup>[20-21]</sup>驱动。

电机驱动关节往往结构复杂, 缺乏柔性和适应性, 容易对水果造成伤害, 不易小型化, 控制系统复杂; 人工肌肉 PMA 驱动关节易于小型化, 关节本体和人工肌肉分离, 通过人工腱实现动力的传递, 腱传动系统中存在摩擦、松弛以及能量损耗的问题无法避免。本文基于气动柔性驱动器 FPA 提出侧摆关节, 可以实现两个方向的左右摆动, 驱动器 FPA 与关节本体一体化, 不需要外加驱动和传递系统, 不存在能量损耗等问题, 柔顺性好, 适应性强, 结构简单, 控制方便, 且便于小型化, 可以弥补现有农业机器人灵巧手驱动关节的不足。

侧摆关节的预期应用如下: 根据人手的结构, 以侧摆关节和弯曲关节为基础, 设计两种具有侧摆功能的 4 自由度手指, 如图 11 所示; 以这两种手指为主要构件, 设计具有 20 个自由度、5 个手指以及 1 个拟人手掌的农业机器人多指灵巧手, 如图 12 所示, 侧摆关节包含在手掌内。相比于仅具有单一弯曲功能的机器人灵巧手, 具有侧摆功能的机器人多指灵巧手具有以下几个优点: 1) 每个手指的动作更加灵活多变, 工作空间明显增大, 不仅仅局限在单一平面内运动; 2) 手指工作空间增大使得机器人在进行果蔬采摘时, 采摘对象的受力更加均匀和平稳, 而且灵巧手的抓取位姿选择更加灵活; 3) 不仅可以实现稳定抓持, 而且可以对采摘对象实现协调操作。

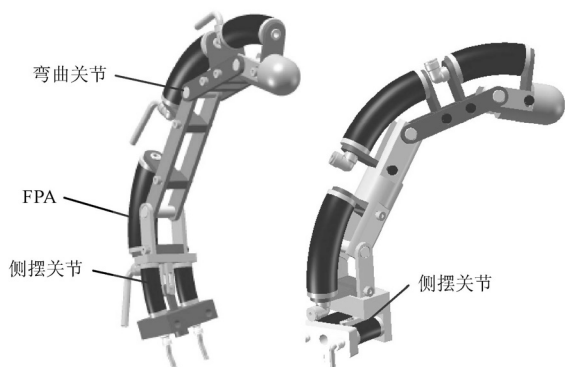


图 11 具有侧摆功能的 4 自由度手指

Fig.11 4-DOF finger based on FPA

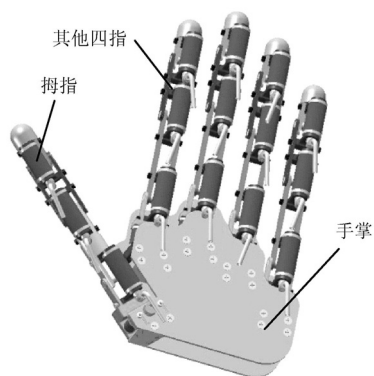


图 12 机器人多指灵巧手背面

Fig.12 Robot multi-fingered dexterous hand

## 5 结 论

基于气动柔性驱动器 FPA 提出了气动柔性侧摆关

节, 它可以实现左右两个方向的侧摆运动;

分析建立了气动柔性侧摆关节的静态模型, 静态特性试验曲线与仿真曲线基本吻合, 验证了静态模型的正确性; 最大静态误差为 0.035 rad, 最大相对偏差为 10.9%, 可以通过闭环进行消除;

进行了侧摆关节的开环阶跃动态响应试验, 试验结果表明关节的动态响应时间在 2 s 左右 (稳态值的公差带  $\Delta=5\%$ ), 基本可以满足农业机器人多指灵巧手的设计与应用。

## [参 考 文 献]

- [1] Caldwell D G, MedranoCerde G A, Goodwin M G. Braided pneumatic actuator control of a multi-Jointed manipulator[C]. //IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics Proceedings. France, 1993: 423—428.
- [2] Caldwell D G, MedranoCerde G A, Goodwin M J. Control of pneumatic muscle actuators[J]. IEEE Control Systems Magazine, 1995, 15(1): 40—48.
- [3] 李宝仁, 刘军, 杨钢. 气动人工肌肉系统建模与仿真[J]. 机械工程学报, 2003, 39(7): 23—28.  
Li Baoren, Liu Jun, Yang Gang. Modeling and simulation of pneumatic muscle system[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(7): 23—28. (in Chinese with English abstract)
- [4] Suzumori, Iikura K, Tanaka S. Applying a flexible micro-actuator to robotic mechanisms[J]. IEEE Control Systems, 1992, 21(3): 21—27.
- [5] Tanaka S, Gofuku Y, Fujino A. Development of a tactile sensing flexible actuator[C]. //Advanced Motion Control. Japan, 1996: 723—728.
- [6] Toshiro N, Mitsuhiko K, Sadaharu Y. Development of pneumatic rotary soft actuator made of silicone rubber[J]. Journal of Robotics and Mechatronics, 2001, 13(1): 17—22.
- [7] Schulz S, Pylatiuk C, Bretthauer G. A new ultralight anthropomorphic hand[C]. //Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics & Automation. Korea, 2001: 420—438.
- [8] 章军, 须文波, 范本隽. 板弹簧柔性手指关节弯曲的模型研究[J]. 机械设计与研究, 2005, 21(2): 53—55.  
Zhang Jun, Xun Wenbo, Fan Benjuan. Study on the bending model of pneumatic flexible finger joints of spring-beam[J]. Machine Design and Research, 2005, 21(2): 53—55. (in Chinese with English abstract)
- [9] Yang Qinghua, Zhang Libin, Bao Guanjuan, et al. Research on novel flexible pneumatic actuator FPA[C]. //Proceedings of IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics. Singapore, 2004: 385—389.
- [10] 张立彬, 王志恒, 杨庆华, 等. 气动柔性五自由度手指运动分析及控制[J]. 中国机械工程, 2008, 19(22): 2661—2665.  
Zhang Libin, Wang Zhiheng, Yang Qinghua, et al. Movement analysis and control of flexible pneumatic 5-DOF finger[J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(22): 2661—2665. (in Chinese with English abstract)

- [11] 杨庆华, 张立彬, 胥芳, 等. 气动柔性弯曲关节的特性及其神经 PID 控制算法研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(4): 88—91.  
Yang Qinghua, Zhang Libin, Xun Fang, et al. Investigation of the characteristics of pneumatic flexible-bending joint and its neural PID controlling algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2004, 20(4): 88—91. (in Chinese with English abstract)
- [12] 鲍官军. 气动柔性驱动器 FPA 的特性及其在多指灵巧手设计中的应用研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2006.  
Bao Guanjun. Research on characteristics of flexible pneumatic actuator FPA and its application in multi-fingered dexterous hand design [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2006. (in Chinese with English abstract)
- [13] Treloar L R G. The physics of rubber elasticity[M]. New York: Oxford University Press, 2005.
- [14] Austruamicrosystems AG. AS5045 data sheet[Z]. 2006.
- [15] Liu H, Meusel P, Seitz N, et al. The modular multisensory DLR-HIT-Hand[J]. Mechanism and Machine Theory, 2007, (42): 612—625.
- [16] <http://www.shadow.org.uk>.
- [17] Lovchik C S, Diftler M A. The robonaut hand: a dexterous obot hand for space[C]. //IEEE Conference on Robotics and Automation. USA, 1999: 907—912.
- [18] Noritsugu T, Kubota M, Yoshimatsu S. Development of pneumatic rotary soft actuator made of silicone rubber[J]. Journal of Robotics and Mechatronics, 2001, 13(1): 17—22.
- [19] Jacobsen S, Wood J, Knutti D, et al. Utah/MIT destrous hand: Work in Progress[J]. IJRR, 1984, 3(4): 21—25.
- [20] Chou Chingping, Black Hannaford. Static and dynamic characteristics of McKibben pneumatic artificial muscles[C]. //Proceeding of IEEE Conference on Robotics and Automation. USA, 1994: 281—286.
- [21] Colbrum W R, Nelson G M, Quinn R D. Modeling of braided pneumatic actuators for robotic control[C]. //Proceeding of the 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Hawall, 2001: 1964—1970.

## Characteristics of side-sway joint based on flexible pneumatic actuator

Zhang Libin, Wang Zhiheng, Bao Guanjun, Qian Shaoming, Yang Qinghua<sup>\*</sup>

(Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Processing Technology (Zhejiang University of Technology),  
Ministry of Education, Hangzhou 310032, China)

**Abstract:** Based on flexible pneumatic actuator (FPA), a new kind of flexible pneumatic side-sway joint was proposed. The side-sway joint is used for designing agricultural dexterous robot multi-fingered hand. The side-sway joint is basically composed of two FPAs. When the two FPAs were inflated with different compressed air pressure, the side-sway joint could realize left and right movement. The force equilibrium equation of the FPA free end was established. The static model of the side-sway joint was obtained, and the static model was also simplified. Experiments were carried out to verify the static model. Experimental results show that the experimental curve matched well with the simulated curve, and there was certain error between them (maximal static error is 0.035 rad). The error cause was analyzed. Then the experiments were carried out to measure the dynamic performances of the side-sway joint. Experimental results show that the step response time of the joint was about 2 s (steady value's tolerance zone  $\Delta=5\%$ ) respected to different expected angle step signals. The side-sway joint can significantly increase the workspace and further improve the adaptability and dexterity of the agricultural dexterous robot hand.

**Key words:** joints, actuators, models, robots, robot dexterous multi-fingered hand