

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.11.009

三自由度并联气动柔性执行器工作空间的研究

石 凯, 李 军*, 张媛媛

(哈尔滨工业大学 气动技术中心, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要:针对三自由度并联气动柔性执行器的工作空间计算问题,对其工作空间的计算方法和评价标准进行了研究。对该类利用柔性结构和压缩空气实现运动的新型执行器进行了运动学分析。通过对其3个气动柔性元件以及两个圆盘组成的结构进行运动学关系的研究,得到了气动柔性元件的长度和执行器末端位置的数学关系。利用搜索法对该数学关系进行了数值计算,获得了该执行器的工作空间包络面,并对不同参数下的工作空间的变化特点和差异性进行了分析研究。研究表明,当选取工作空间的体积、最大工作半径以及最大弯曲角度作为衡量工作空间大小的指标时,上述3个指标均可随柔性元件伸长率 k 及安装结构参数 S 的增大而增大。该结论可以对该执行器的结构设计和理论研究提供指导。

关键词:气动;柔性;工作空间

中图分类号:TH138.9

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)11-1339-05

Workspace research on 3-DOF parallel pneumatic flexible actuator

SHI Kai, LI Jun, ZHANG Yuan-yuan

(Pneumatic technology center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: Aiming at the problems of workspace calculation of 3-DOF parallel pneumatic flexible actuator, a method of workspace calculation and an evaluation standard were studied. The kinematics characteristics of this actuator was analyzed, and this actuator could utilize the flexible structure and compressed air to make an action. The actuator is composed of three pneumatic flexible components and two disks, and through the study of the structure's kinematics relationship, the relationship between the lengths of the three flexible components and the position of the end of the actuator was gotten. The mathematic relation was computed with search method, workspace envelope surface of this actuator was obtained, and changing characteristics and differences of workspace under different parameters were analyzed. The results indicate that: when the volume of workspace, maximum working radius and maximum angel of bending were selected as indexes to measure the size of workspace, above three indexes increases with the increase of the flexible components elongation k and the installation structure parameters S . The conclusion can provide theoretical guidance to design structure and research theory for this actuator.

Key words: pneumatic; flexible; workspace

0 引 言

常见的柔性执行器驱动方式有形状记忆合金(SMA)驱动、气(液)压驱动、电场聚合物(EAP)驱动等。其中,气压驱动有功率密度大、空气压缩性好和成本低等特点,因此笔者研究的执行器选择压缩气体作

为动力源。气动柔性执行器能够利用柔性结构来完成一些特殊的工作,因此可作为基础元件用于构成软体机构,如气动软体机器人,不仅克服了传统刚性机器人对环境适应差的不足,在安全性上也得到较大的提高^[1]。

国内外已针对三自由度并联气动柔性执行器进行了较多的研究。浙江工业大学的杨庆华等人^[2-3]提出

收稿日期:2016-06-03

作者简介:石 凯(1990-),男,浙江绍兴人,硕士研究生,主要从事气动软体机器人方面的研究. E-mail: mokenali@foxmail.com

通信联系人:李 军,男,副教授,硕士生导师. E-mail: lijun@hit.edu.cn

了一种气动柔性驱动器 FPA (Flexible Pneumatic Actuator) 并以此为基础设计了气动柔性球关节^[4]。在此基础上,该团队又设计了一种大柔性的灵巧手指^[5],利用弹簧、橡胶管等结构来增大手指关节的柔性^[6]。兰州交通大学的赵志刚等人^[7]基于气动人工肌肉和缆绳组合驱动,提出了一种三自由度柔性气动连续体机器人关节。美国宾州州立大学的 M. Grissom 等人^[8-9]受章鱼启发研制了 OctArm 连续机械手,可由多个单元串联构成,每个单元含有 3 个气动肌肉。德国的 FESTO 公司在 2010 年推出了一款叫做“Bionic Handling Assistant (BHA)”的气动机械手臂^[10-11],由一种新型气动驱动器串联而成,每个驱动器有 3 个并联的波纹管式气动伸缩元件。

笔者研究三自由度并联气动柔性执行器的工作空间,首先对其进行运动学分析,建立相应运动学正解和反解的分析计算;然后,根据工作空间特点制定相应的评价标准,并利用数值方法编程得到工作空间;最后讨论结构参数对工作空间的影响。

1 执行器运动学分析

三自由度并联气动柔性执行器由三根气动柔性元件和两个圆盘组成。通过控制三根驱动器内部的压力,使其伸长长度不同而实现执行器的弯曲。三自由度并联气动柔性执行器的结构示意图如图 1 所示。



图 1 三自由度并联气动柔性执行器结构示意图

为对该类三自由度并联柔性执行器进行运动学分析,本研究首先将三自由度并联气动柔性执行器简化,简化模型如图 2 所示。其由两个圆盘(分别为固定端圆盘 A 和活动端圆盘 B)和 3 个可弯曲的柱状体(即柔性元件 1#、2#、3#)组成。

本研究在柔性执行器的固定端和活动端分别建立固定坐标系 $OXYZ$ 和动坐标系 $O_1X_1Y_1Z_1$ 。固定坐标系的原点 O 位于固定端圆盘 A 中心,其 OY 轴位于圆盘 A 中心与 1# 伸长元件在圆盘 A 上的相交圆圆心的连线的延长线上,其 OZ 轴与圆盘 A 垂直,指向执行器内部,

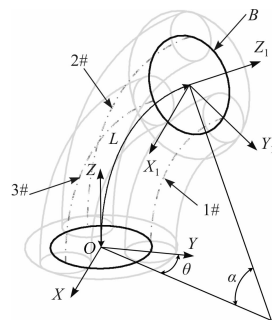


图 2 三自由度并联气动柔性执行器简化模型
其 OX 轴与 OY 和 OZ 轴三者组成右手坐标系。动坐标系的原点 O_1 位于活动端圆盘 B 中心,其 O_1Y_1 轴位于圆盘 B 中心与 1# 伸长元件在圆盘 B 上的相交圆圆心的连线的延长线上,其 O_1Z_1 轴与圆盘 B 垂直,指向执行器外部,其 O_1X_1 轴与 O_1Y_1 和 O_1Z_1 轴三者组成右手坐标系。执行器两圆盘中心连线在 OXY 平面上的投影与 OY 轴夹角为朝向角 θ ,图中所示角度为正。执行器弯曲角度是 α ,执行器长度即执行器中轴线长度为 L , θ 、 α 、 L 构成了描述执行器的 3 个状态参数。

柔性执行器两端坐标系的齐次坐标变换矩阵为 1_0T ,当 $\alpha \neq 0$ 时, 1_0T 如下式所示:

$${}^1_0T = \begin{bmatrix} c^2\theta + s^2\theta c\alpha & -cs\theta + cs\theta c\alpha & s\theta s\alpha & s\theta \frac{L}{\alpha}(1 - c\alpha) \\ -cs\theta + cs\theta c\alpha & s^2\theta + c^2\theta c\alpha & c\theta s\alpha & c\theta \frac{L}{\alpha}(1 - c\alpha) \\ -s\alpha s\theta & -s\alpha c\theta & c\alpha & \frac{L}{\alpha}s\alpha \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

当 $\alpha = 0$ 时, 1_0T 如下式所示:

$${}^1_0T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $s\alpha = \sin\alpha$, $c\alpha = \cos\alpha$, $s\theta = \sin\theta$, $c\theta = \cos\theta$, $s^2\theta = \sin^2\theta$, $c^2\theta = \cos^2\theta$, $cs\theta = \sin\theta\cos\theta$ 。下文亦采用这种简化方法。

由式(1)和式(2)可以得到坐标系 $O_1X_1Y_1Z_1$ 的原点 O_1 在坐标系 $OXYZ$ 中的坐标为:

$$[x \ y \ z]^T = \begin{cases} \begin{bmatrix} s\theta \frac{L}{\alpha}(1 - c\alpha) \\ c\theta \frac{L}{\alpha}(1 - c\alpha) \\ \frac{L}{\alpha}s\alpha \end{bmatrix} & \alpha \neq 0 \\ [0 \ 0 \ L]^T & \alpha = 0 \end{cases} \quad (3)$$

柔性执行器 3 个并联的柔性元件长度分别为 L_1 、 L_2 、 L_3 , 3 个元件的两端均在半径为 r 的圆上, 且同一圆上的 3 个端部间隔为 120° , 其结构示意图如图 3 所示。 L_1 对应元件端部与底圆圆心的连线为 Y 轴所在。

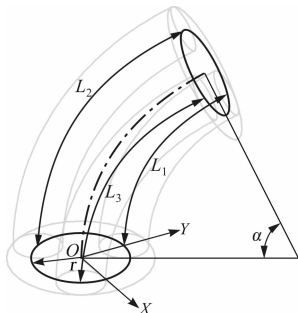


图 3 三自由度并联柔性执行器结构示意图

长度 L_1 、 L_2 、 L_3 可用 θ 、 α 、 L 及 r 表示:

$$\begin{cases} L_1 = \left(\frac{L}{\alpha} - r \cos \theta \right) \alpha = L - r \alpha \cos \theta \\ L_2 = L - r \alpha \cos \left(\frac{2\pi}{3} + \theta \right) \\ L_3 = L - r \alpha \cos \left(\frac{4\pi}{3} + \theta \right) \end{cases} \quad (4)$$

当 $\alpha = 0$ 时, $L_1 = L_2 = L_3 = L$, 式(4) 依然成立。

由式(4) 可将柔性执行器末端状态参数由 3 个柔性元件的长度表示出来, 如下式所示:

$$\begin{cases} L = \frac{L_1 + L_2 + L_3}{3} \\ \theta = \text{atan2}(\sqrt{3}L_2 - \sqrt{3}L_3, L_2 + L_3 - 2L_1) \\ \alpha = \frac{\sqrt{2[(L_1 - L_2)^2 + (L_2 - L_3)^2 + (L_3 - L_1)^2]}}{3r} \end{cases} \quad (5)$$

2 执行器工作空间分析

工作空间是指执行器末端的工作区域, 是衡量执行器性能的重要指标之一。对于三自由度并联气动柔性执行器, 其工作空间定义为活动端坐标系原点 O_1 在固定坐标系 $OXYZ$ 中能到达的位置的集合。

工作空间的确定方法主要有两类, 解析法和数值法^[12]。解析法需要复杂的公式推导, 数值法则是利用执行器的约束条件来确定工作空间边界。数值法可以进一步分为两种方法, 第一种方法是利用运动学正解来确定工作空间, 即遍历柔性执行器长度, 获得所有的空间位置; 另一种方法是利用运动学逆解来确定工作空间边界, 在一定范围内取执行器朝向角 θ , 执行器弯曲角度 α 和执行器长度 L 的值, 通过运动学逆解来确定各柔性元件的长度, 通过判断柔性元件的长度是

否在其工作范围内来判断对应的状态参数是否是其工作空间内某点对应的状态参数。这种方法计算效率不高但其直观明确, 容易编程。下文将采用这种方法来确定三自由度并联气动柔性执行器的工作空间。

基于上述数值法工作空间的计算, 本研究制定三自由度并联气动柔性执行器的工作空间边界计算程序流程图, 如图 4 所示。

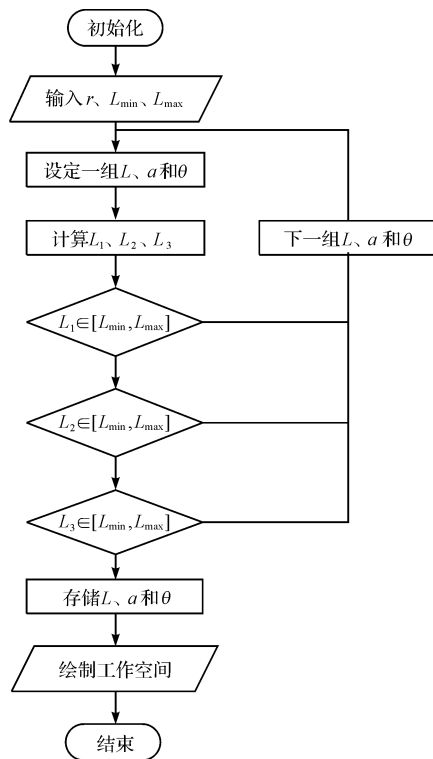


图 4 工作空间程序流程图

输入量 r —安装圆盘的半径; $L_{\max}$, $L_{\min}$ —柔性元件的最长和最短长度; 设定量 θ —执行器朝向角; α —执行器弯曲角度; L —执行器长度; 计算量 L_1 , L_2 , L_3 —柔性执行器 3 个并联的柔性元件长度

图 4 中, 首先确定执行器的结构尺寸 r 、 $L_{\max}$ 和 $L_{\min}$, 在确定 L 、 α 和 θ 的值后, 根据式(4) 计算 L_1 、 L_2 、 L_3 的值, 通过判断其长度是否在 $[L_{\min}, L_{\max}]$ 内来确定该 L 、 α 和 θ 是否是工作空间内的点对应的状态参数。

本研究根据图 4 所示流程图编制程序得到三自由度并联气动柔性执行器的工作空间。选取柔性元件的最短长度为 110 mm, 柔性元件的最长长度为 210 mm, 安装盘的半径为 60 mm 时的工作空间为例, 绘出此时工作空间的上包络面及对应包络面等高线图如图 5 所示, 工作空间下包络面及对应包络面等高线图如图 6 所示。可见, 三自由度并联气动柔性执行器的工作空间关于 OXZ 平面以及过 Z 轴与 OXZ 平面夹角为 $\pm 60^\circ$ 的两个平面呈镜像对称, 以 Z 轴为中心呈旋转角为 120° 的旋转分布。

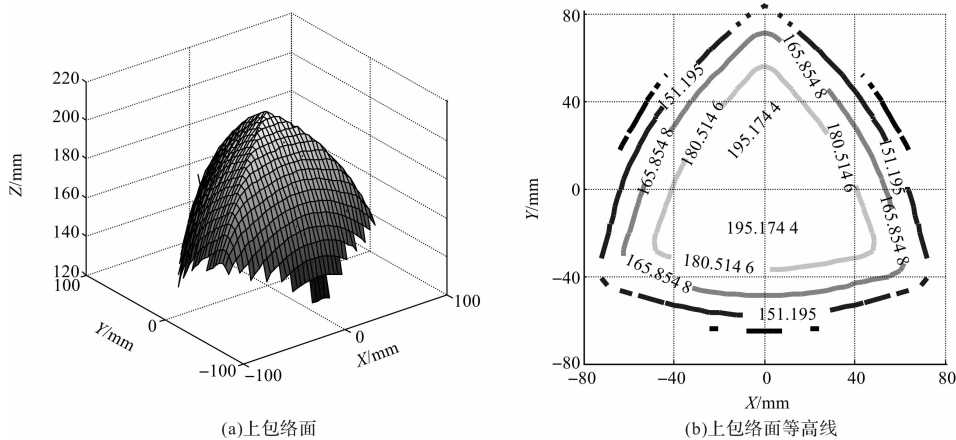


图 5 工作空间上包络面及其等高线图

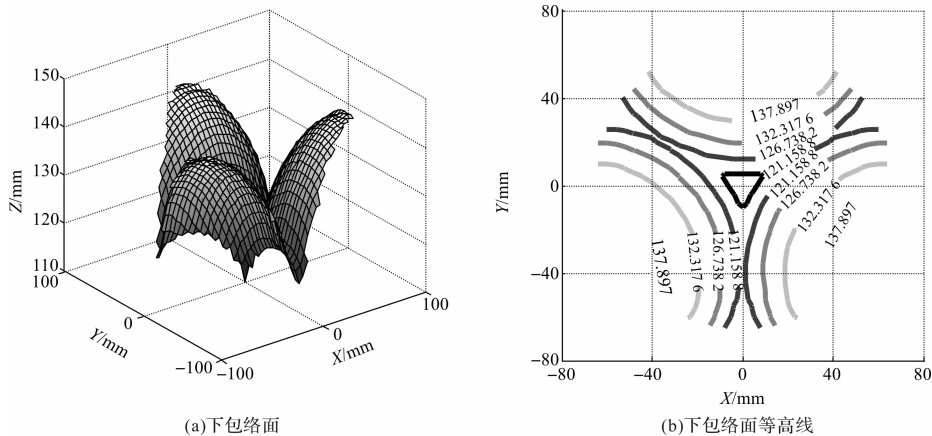


图 6 工作空间下包络面及其等高线图

为了更加清晰地展示工作空间的形状,本研究在多个过 Z 轴与 OXZ 平面呈 θ 夹角(即朝向角)的平面上做工作空间的截面,如图 7 所示。图 7 中,展示了朝向角 $\theta = 0^\circ, 12^\circ, 24^\circ, 36^\circ, 48^\circ, 60^\circ$ 时的工作空间截面。

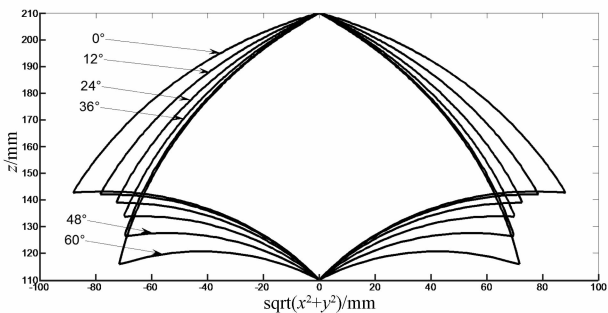


图 7 不同 θ 时的工作空间截面

如图 7 所示,截面边界曲线形状比较相似,工作空间最高点与最低点间垂直距离不变,但下包络面在 Z 方向所能达到的最大值减小。而随着朝向角 θ 的增大,执行器所能到达的最大的离 Z 轴的距离先减小后增大。

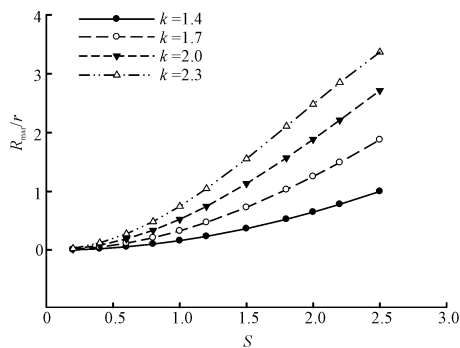
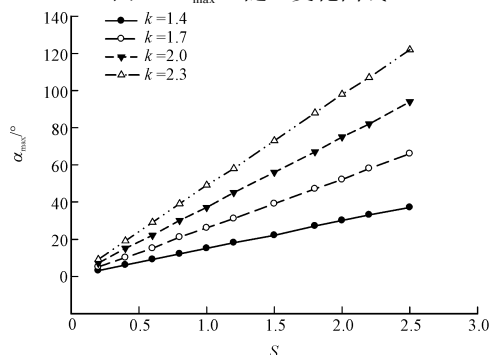
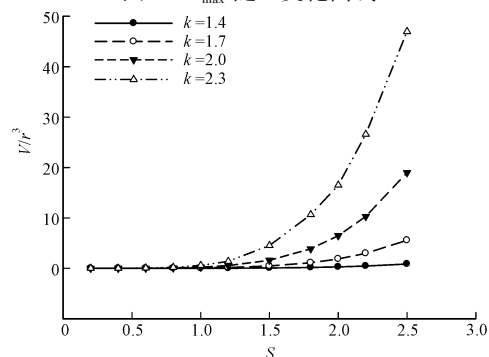
不同参数下的执行器工作空间图形基本类似于上图,难以进行对比分析,因此,本研究选择 V (工作空间的体积)、 $R_{\max}$ (工作空间在 OXY 平面内投影的最大半径)以及 $\alpha_{\max}$ (执行器最大弯曲角度)3 个参数作为衡

量工作空间的指标,对其工作空间进行分析。

本研究设定 $L_{\max}$ 和 $L_{\min}$ 分别为柔性元件的最长和最短长度; r 为安装圆盘的半径。对上述 3 个参量以 r 为基准进行归一化处理。本研究定义 $k = L_{\max}/L_{\min}$ 为柔性元件伸长率, $S = L_{\min}/r$ 为安装结构参数。笔者分别取 $k = 1.4, 1.7, 2.0, 2.3$ 。 S 作为自变量,其取值范围在 $0.2 \sim 2.5$ 之间。此时的工作空间计算结果如下:归一化后的工作空间衡量指标 $R_{\max}/r$ 随 S 变化的曲线如图 8 所示; $\alpha_{\max}$ 随 S 变化的曲线如图 9 所示; V/r^3 随 S 变化的曲线如图 10 所示。

可见, k 值或 S 值变大会使工作空间的 3 个衡量指标变大。如图 8 所示,相比于变化 k 值,增大 S 对提高 $R_{\max}$ 影响更显著。如图 9 所示,最大弯曲角度的变化基本呈线性。如图 10 所示,当 $S > 1.5$ 时,工作空间的体积受 k 变化的影响较大,且随着 k 增大,曲线的变化率越大;当 $k > 1.7$ 时,工作空间的体积受 S 变化的影响较大,且随着 S 增大,曲线的变化率越大;当 $k < 1.4$ 时,工作空间的体积受 S 变化的影响很小。因此,为增大工作空间,应该取较大 S 和 k 值,即执行器更加瘦高,柔性元件伸长率更大。

上述工作空间的归一化计算方法可作为该气动柔性执行器的计算基础,用上述方法计算实际尺寸执行

图8 $R_{\max}/r$ 随 S 变化曲线图9 $\alpha_{\max}$ 随 S 变化曲线图10 V/r^3 随 S 变化曲线

器的工作空间。图中曲线的变化规律可作为不同参数下实际工作空间大小的检验标准。

上述所得工作空间的规律也对该气动柔性执行器的设计及实验具有指导意义。本研究的三自由度并联柔性执行器可在伸长元件的合理弹性范围内,选取较大的 k 值,在此 k 值下可选取较大的 S 值,即较大的 $L_{\min}$ 值,综合考虑各项约束条件选取上述参数,可得到最佳工作空间时的执行器设计方案。由于伸长率 k 受限于柔性元件,在执行器设计中,主要考虑 S 的取值。

3 结束语

(1) 本研究提出了三自由度并联气动柔性执行器,

建立坐标系并利用齐次变换对执行器进行了运动学分析,得到了相应的运动学正解和反解方程。

(2) 笔者用数值方法编程得到了执行器的工作空间图像。图像表明该执行器的工作空间是以 Z 轴为中心线、旋转角为 120° 的旋转对称的蘑菇状空间。

(3) 笔者选取3个指标来衡量执行器的工作空间,并进行归一化处理后得到工作空间随结构参数变化的规律:工作空间随 k 值或 S 值的增大而增大,根据工作空间的变化规律可对以后的执行器设计提供理论指导。

参考文献(References):

- [1] 尤小丹,宋小波,陈峰. 软体机器人的分类与加工制造研究[J]. 自动化仪表,2014,35(8):5-9.
- [2] 鲍官军. 气动柔性驱动器 FPA 的特性及其在多灵巧手设计中的应用研究[D]. 杭州:浙江工业大学机械工程学院,2006.
- [3] 杨庆华. 基于气动柔性驱动器的气动柔性关节及其应用研究[D]. 杭州:浙江工业大学机械工程学院,2005.
- [4] 邵铁锋. 气动柔性象鼻型连续机器人研究[D]. 杭州:浙江工业大学机械工程学院,2014.
- [5] 张建超,杨庆华,邵铁锋,鲍官军. 大柔性灵巧手指弯曲仿真研究[J]. 机电工程,2014,32(2):182-185.
- [6] 张海英. 基于 PLC 的气动及盘式工业机械臂设计[J]. 液压气动与密封,2013,33(3):74-76.
- [7] 赵志刚,陈志刚. 柔性气动连续体机器人关节结构设计与运动学分析[J]. 机械科学与技术,2015,34(2):184-187.
- [8] GRISSOM M D, CHITRAKARAN V, DIENNO D, et al. Design and experimental testing of the OctArm soft robot manipulator[C]// Defense and Security Symposium International Society for Optics and Photonics. SanJose: SPIE, 2006: 6230.
- [9] MCMAHAN W. Field Trials and Testing of the OctArm Continuum Manipulator[C]// International Conference on Robotics and Automation. Orlando: IEEE, 2006: 2336-2341.
- [10] TOBIAS M, ALEXANDER H, OLIVER S. A Variable Curvature Continuum Kinematics for Kinematic Control of the Bionic Handling Assistant[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2014, 30(4): 935-949.
- [11] GRZESIAK A, BECKER R, VERL A. The Bionic Handling Assistant: a success story of additive manufacturing[J]. Assembly Automation, 2011, 31(4): 329-333.
- [12] 钟琪,刘贵杰,王安忆,等. 移动副驱动的 Delta 机构工作空间分析及机构优化研究[J]. 机电工程, 2015, 32(11): 1407-1411.

[编辑:李辉]

本文引用格式:

石凯,李军,张媛媛. 三自由度并联气动柔性执行器工作空间的研究[J]. 机电工程,2016,33(11):1339-1343.

SHI Kai, LI Jun, ZHANG Yuan-yuan. Workspace research on 3-DOF parallel pneumatic flexible actuator[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016, 33(11): 1339-1343.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>