

气动柔性摆动关节静态模型^{*}

鲍官军¹ 邵铁锋² 李尚会¹ 王志恒¹ 杨庆华¹

(1. 浙江工业大学特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室, 杭州 310032;

2. 中国计量学院工程训练中心, 杭州 310018)

【摘要】 提出了一种基于气动柔性驱动器(FPA)的摆动关节,该关节由左、右两个对称分布的弧形FPA并联而成,弧形FPA两个活动端与摆动关节的动平台固定连接,动平台可以绕着转动副摆动。改变两个弧形FPA的内腔气压,驱动左、右弧形FPA输出不同大小的转动角度,从而实现该关节的摆动运动。基于力矩平衡原理建立了摆动关节的静态模型,仿真分析表明摆动关节的转动角度与弧形FPA内腔气体压力基本呈线性关系,并且转动角度随初始角度、FPA平均半径、预拉伸角度的增大而增大,随FPA壁厚的增大而减小。实验结果表明所建立的数学模型能够描述摆动关节的静态特性。

关键词: 摆动关节 气动柔性驱动器 静态模型

中图分类号: TP241 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)06-0198-05

Static Model of Flexible Pneumatic Swaying Joint

Bao Guanjun¹ Shao Tiefeng² Li Shanghui¹ Wang Zhiheng¹ Yang Qinghua¹

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

2. Engineering Training Center, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract

A swaying joint was proposed based on the flexible pneumatic actuator (FPA), which was composed of two symmetrical and parallel-connected arc-shaped FPAs. The movable ends of arc-shaped FPAs were connected with the movable deck and the latter could sway around the revolving pair. By changing the air pressures inside the two arc-shaped FPAs, they would have turning angles with different sizes, which realized the swaying movement of the joint. The static model was established based on the equilibrium of moments. Simulation results showed that the turning angle of the swaying joint was basically linear with the air pressure inside the arc-shaped FPA. The turning angle increased with the initial angle, average radius of FPA and pre-stretching angle, and decreased with the shell thickness of FPA. Experimental results implied that the established mathematic model could basically describe the static characteristics of the swaying joint.

Key words Swaying joint, Flexible pneumatic actuator, Static model

引言

驱动关节是机器人结构设计和控制的基础,目前较为常见并且应用广泛的机器人关节以电机驱动

为主,采用齿轮或绳索方式进行力/力矩传递^[1]。近年来机器人研究和应用向农业^[2]和服务业^[3]领域扩展,相应的对其驱动和关节性能提出了更高的要求,如安全性和柔顺性,以适应不同的抓取目标形

收稿日期: 2010-08-09 修回日期: 2010-10-27

^{*} 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2009AA04Z209)、浙江省自然科学基金资助项目(Y1080485)、浙江省自然科学基金杰出青年团队项目(R1090674)和浙江省机械电子工程重中之重学科开放基金资助项目(20090325)

作者简介: 鲍官军,副教授,博士,主要从事机器人驱动及控制研究,E-mail: gjbao@zjut.edu.cn

通讯作者: 杨庆华,教授,博士生导师,主要从事机器人及精密塑性成型研究,E-mail: robot@zjut.edu.cn

状、物理特性和生物特性。气动人工肌肉驱动的拮抗型柔性关节^[4-5]是一种柔性和适应性较好的机器人关节结构,目前已有该关节在仿人型机器人^[6]、机械外骨骼^[7-8]、家庭服务机器人^[9]等方面的应用研究。类似的柔性关节还有日本冈山大学的 Toshiro Noritsugu 等研究开发的旋转型气动柔性驱动关节^[10]、德国 Karlsruhe 计算机科学应用研究中心研制的柔性流体驱动关节^[11]以及浙江工业大学研制的气动柔性弯曲关节^[12]和扭转关节^[13-14]等。该类柔性关节以压缩气体/压力液体作为驱动,并且执行部件以橡胶材料为主,具有充分的柔顺性和安全性,尤其适用于农业和服务业机器人。

本文基于气动柔性驱动器 (flexible pneumatic actuator, 简称 FPA)^[15]提出一种摆动关节,详细描述其结构原理,基于力矩平衡原理建立其静态模型,并对其主要结构参数进行仿真分析,制作样机进行静态实验研究。

1 摆动关节结构原理

1.1 结构设计

气动柔性摆动关节由左、右两个对称分布的弧形 FPA 并联而成,弧形 FPA 两个活动端与摆动关节的动平台固定连接,弧形 FPA 两个通气孔端与摆动关节的静平台固定连接。关节的静平台和动平台通过转动副连接,动平台可以绕着转动副摆动,其结构如图 1a 所示。

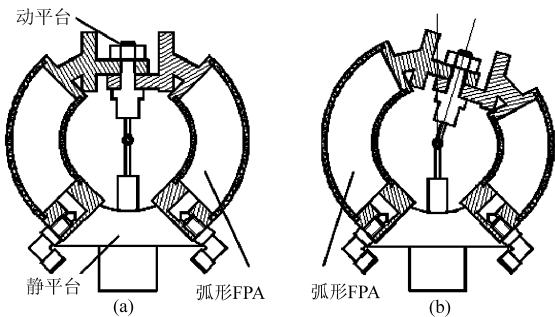


图 1 摆动关节结构原理图
Fig. 1 Structure of swaying joint
(a) 基本结构 (b) 摆动状态

1.2 工作原理

摆动关节的工作原理如图 1b 所示:与拮抗型柔性关节类似^[4],摆动关节工作前需向两个弧形 FPA 内腔中预通入相同压力的压缩空气,在等压气体作用下,两个弧形 FPA 发生相同的伸长,即关节在原始位置时,弧形 FPA 均有一定量的预伸长量;改变两个弧形 FPA 的内腔气压,当左边弧形 FPA 的内腔气压大于右边弧形 FPA 的内腔气压时,左边弧形 FPA 伸长,右边弧形 FPA 缩短,摆动关节向右摆动,

反之则向左摆动。

2 摆动关节静态模型

对摆动关节弧形 FPA 的活动端 (即与动平台固定的一端) 进行力矩平衡分析,如图 2 所示。 M 为摆动关节受到的外力矩,两个弧形 FPA 内部充入不同压力的压缩气体,则 M 由两个弧形 FPA 承受,将外力矩 M 分解成左右弧形 FPA 活动端上的分力矩 M_l 、 M_r ; M_{la} 、 M_{ra} 分别为左、右 FPA 的弹力产生的力矩; M_{lp} 、 M_{rp} 为左、右 FPA 内腔压力与大气压力差值在端面产生的力矩。

对摆动关节作如下假设:①摆动关节的两个 FPA 完全一样。②摆动关节的 FPA 在变形过程中平均半径保持不变。③运动过程中弧形 FPA 的圆心位置保持不变,即 FPA 沿弧形伸长或缩短。

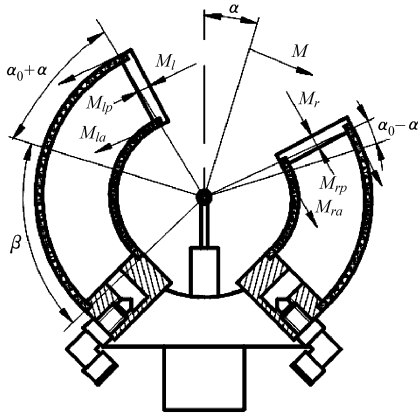


图 2 弧形 FPA 力矩平衡分析
Fig. 2 Moment equilibrium analysis of FPA

摆动关节两个弧形 FPA 预设气压 p_0 使其旋转一个预拉伸角度 α_0 。对弧形 FPA 的活动端外力 F 为零的情况下进行受力分析,如图 3 所示。

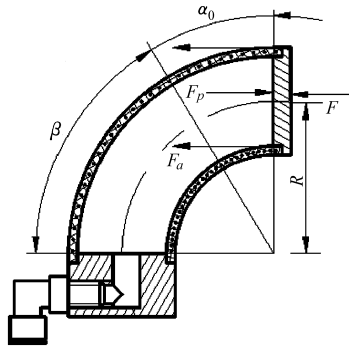


图 3 弧形 FPA 受力分析
Fig. 3 Force analysis of FPA

其分析过程与气动柔性扭转关节 FPA 转角模型^[13]类似,可知

$$\alpha_0 = \left[\frac{2Et_0}{2Et_0 - r_0(p_0 - p_{atm})} - 1 \right] \beta \quad (1)$$

式中 E ——弧形 FPA 的弹性模量,MPa

t_0 ——弧形 FPA 的初始壁厚,mm
 r_0 ——弧形 FPA 的平均半径,mm
 p_{atm} ——大气压力,MPa
 β ——弧形 FPA 的初始角度

从而得

$$p_0 = \frac{2Et_0(\alpha_0 + \beta - 1)}{r_0(\alpha_0 + \beta)} + p_{atm} \tag{2}$$

由力矩平衡将外力矩 M 分解成左、右两个弧形 FPA 上的 M_l 、 M_r ,则有

$$M = M_r - M_l \tag{3}$$

由左边弧形 FPA 活动端的力矩平衡可知

$$M_{lp} - M_{la} - M_l = 0 \tag{4}$$

左边弧形 FPA 内腔气压产生的力矩为

$$M_{lp} = \pi R r_0^2 (p_l - p_{atm}) \tag{5}$$

式中 p_l ——左边弧形 FPA 的内腔气压,MPa

R ——摆动关节 FPA 的弧形半径,mm

左边弧形 FPA 弹力产生的力矩为

$$M_{la} = 2\pi E r_0 t_0 \left(R - \frac{L}{\beta + \alpha_0 - \alpha} \right) \tag{6}$$

其中

$$L = R\beta$$

式中 L ——摆动关节 FPA 的初始长度,mm

同理,对右边的弧形 FPA 活动端进行力矩分析,可得

$$M_{ra} - M_{rp} + M_r = 0 \tag{7}$$

$$M_{rp} = \pi R r_0^2 (p_r - p_{atm}) \tag{8}$$

式中 p_r ——右边弧形 FPA 的内腔气压,MPa

$$M_{ra} = 2\pi E r_0 t_0 \left(R - \frac{L}{\beta + \alpha_0 + \alpha} \right) \tag{9}$$

由式(3)、(4)、(7)得

$$M_{rp} + M_{la} - M_{lp} - M_{ra} = M \tag{10}$$

将式(5)、(6)、(8)、(9)代入式(10)解得摆动关节转角

$$\alpha = \frac{-2\pi E L r_0 t_0 + \sqrt{(2\pi E L r_0 t_0)^2 + (\beta + \alpha_0)^2 [\pi R r_0^2 (p_r - p_l) - M]^2}}{\pi R r_0^2 (p_r - p_l) - M} \tag{11}$$

当外力矩 M 为零时,式(11)化简为

$$\alpha = \begin{cases} \frac{-2\pi E L t_0 + \sqrt{(2\pi E L t_0)^2 + (\beta + \alpha_0)^2 [\pi R r_0 (p_r - p_l)]^2}}{\pi R r_0 (p_r - p_l)} & (p_r \neq p_l) \\ 0 & (p_r = p_l) \end{cases} \tag{12}$$

3 仿真分析

由式(12)可知,摆动关节转动角度 α 与其弧形

FPA 的初始角度 β 、预拉伸角度 α_0 、弧形 FPA 初始壁厚 t_0 和弧形 FPA 平均半径 r_0 有关。根据式(12)和表 1 所示参数,对摆动关节结构参数与其转动角度的关系进行仿真分析。

表 1 摆动关节弧形 FPA 静态模型仿真参数
Tab.1 Static simulation parameters of FPA

参数	数值
平均半径 r_0 /mm	6.0
初始壁厚 t_0 /mm	2.0
初始角度 $\beta/(^\circ)$	90
预拉伸角度 $\alpha_0/(^\circ)$	20
弹性模量 E /MPa	2.0
大气压力 p_{atm} /MPa	0.1
弧形半径 R /mm	25.0

图 4 和图 5 分别为 $p_l = 0.1$ MPa、 $p_r = 0.1$ MPa 时,内腔压力与摆动关节转角的关系曲线。从图中可见,该曲线近似为一条直线,即 α 与 p 之间基本呈线性关系。

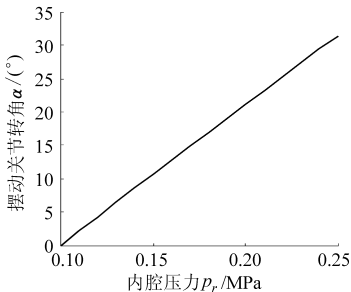


图 4 内腔压力 p_r 与摆动关节转角 α 的关系($p_l = 0.1$ MPa)

Fig.4 Pressure p_r vs turning angle α

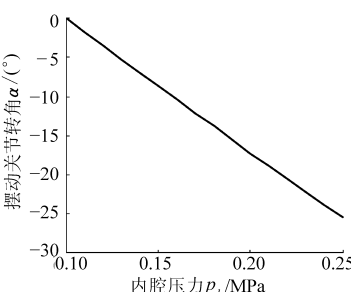


图 5 内腔压力 p_l 与摆动关节转角 α 的关系($p_r = 0.1$ MPa)

Fig.5 Pressure p_l vs turning angle α

由图 6、7 可知,在同等压力作用下, α 随 β 和 r_0 的增大而增大;由图 8 所示的曲线关系可知,在同等压力作用下, α 随 t_0 的增大而减小;由图 9 所示的曲线关系可知,在同等压力作用下, α 随 α_0 的增大而增大。

由上述仿真分析可知:在实际设计中,可以通过增大关节的初始转角、FPA 平均半径或预拉伸角度、减小 FPA 壁厚获得较大的摆动关节输出转动角度。

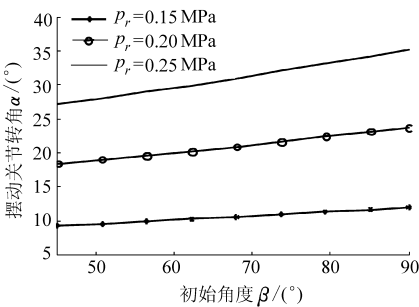


图 6 β 与 α 的关系 ($p_l = 0.1$ MPa)

Fig. 6 Curves of β and α ($p_l = 0.1$ MPa)

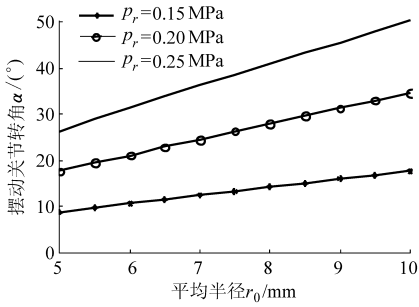


图 7 r_0 与 α 的关系 ($p_l = 0.1$ MPa)

Fig. 7 Curves of r_0 and α ($p_l = 0.1$ MPa)

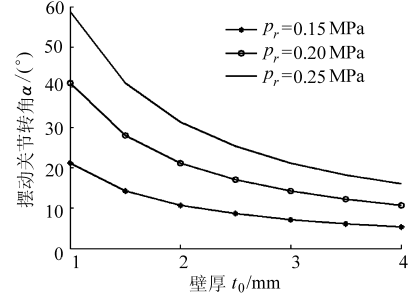


图 8 t_0 与 α 的关系 ($p_l = 0.1$ MPa)

Fig. 8 Curves of t_0 and α ($p_l = 0.1$ MPa)

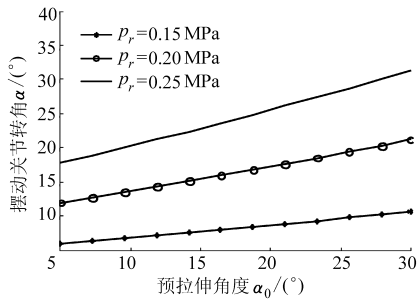


图 9 α_0 与 α 的关系 ($p_l = 0.1$ MPa)

Fig. 9 Curves of α_0 and α ($p_l = 0.1$ MPa)

4 实验与分析

4.1 实验原理

实验原理如图 10 所示。空压机提供系统的动力源;压缩气体贮气罐容积为 0.26 m³;过滤减压阀的作用是过滤压缩气体并降低系统压力;油雾分离器进一步过滤压缩气体;PCL-812PG 数据采集卡通过 D/A 输出控制电气比例阀的电压信号,从而改变弧形 FPA 的内腔气压,同时通过 A/D 转换通道对电气比例阀压力反馈信号进行检测;弧形 FPA 旋转角度通过非接触式角度传感器 AS5045 测量,测量的角度通过单片机系统以 CAN 总线方式传输给工控机;工控机负责数据的处理、保存和系统控制。

4.2 实验结果与讨论

外力/力矩为零条件下的实验结果与仿真曲线如图 11 所示。实验照片如图 12 所示。

由实验和仿真结果可知:实验数据与仿真曲线基本吻合,建立的数学模型能基本反映摆动关节的静态特性。

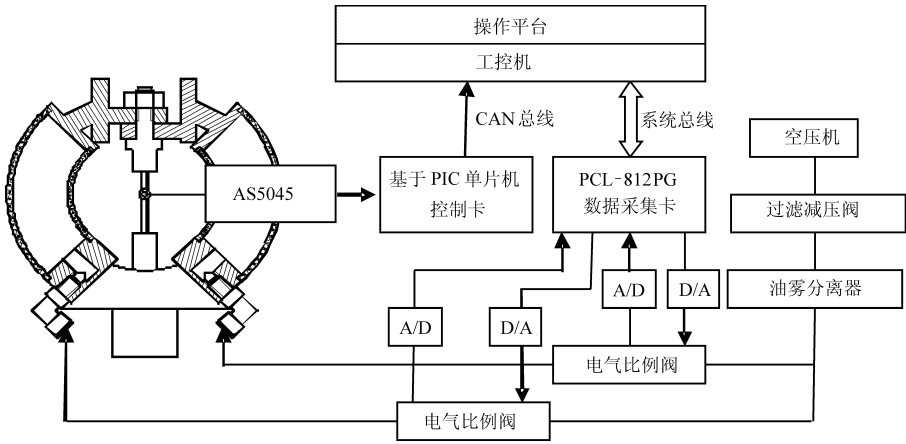


图 10 摆动关节实验原理图

Fig. 10 Experimental schematic of swaying joint

摆动关节充气过程的压力转角曲线与放气过程的压力转角曲线并不重合,而是存在一个滞环。其原因是弧形 FPA 主要由橡胶材料制成,橡胶材料本身具有显著的滞回特性。

摆动关节的压力-转角曲线在起始阶段与理论值吻合较好,而当转角逐渐增大时,转角误差越来越大,其原因是由于制作工艺、材料等因素导致摆动关节弧形 FPA 的性能差异,充气后并不完全按照理论

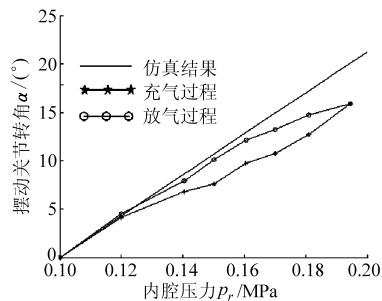


图 11 摆动关节静态实验与仿真曲线

Fig. 11 Curves of static experiment and simulation

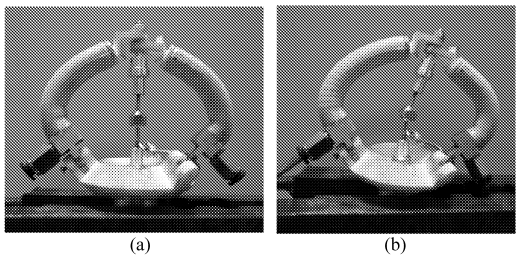


图 12 气动柔性摆动关节

Fig. 12 Swaying joint

(a) 初始状态 (b) 摆动状态

模型规律运动。

5 结论

(1) 基于气动柔性驱动器 FPA 提出了一种气动柔性摆动关节,该关节采用橡胶柔性结构和压缩

气体驱动,具有良好的柔顺性和安全性,尤其适用于农业机器人、服务机器人等研究。

(2) 基于力矩平衡原理建立气动柔性摆动关节的静态模型,仿真与实验结果表明建立的数学模型较为准确,基本能反映摆动关节的静态特性。

参 考 文 献

1 张立彬,杨庆华,胥芳,等. 机器人多指灵巧手及其驱动系统研究的现状[J]. 农业工程学报,2004, 20(3): 271 ~ 275.
Zhang Libin, Yang Qinghua, Xu Fang, et al. Review of research on multi-fingered robot hand and its driving system [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2004, 20(3): 271 ~ 275. (in Chinese)

2 陈帝伊,陈建海,马孝义. 农业机器人关键技术及应用研究进展[J]. 农机化研究,2010,32(5): 207 ~ 211.
Chen Diyi, Chen Jianhai, Ma Xiaoyi. Agricultural robot key technology and application study progress [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010, 32(5): 207 ~ 211. (in Chinese)

3 王田苗,陈殿生,殷兰兰. 服务机器人辅助老年人生活的新模式与必要性[J]. 机器人技术与应用,2010(1): 2 ~ 5.
Wang Tianmiao, Chen Diansheng, Yin Lanlan. New model and necessary of servo robot helping the elderly [J]. Robot Technique and Application, 2010(1): 2 ~ 5. (in Chinese)

4 Xiacong Z, Guoliang T, Bin Y, et al. Adaptive robust posture control of a pneumatic muscles driven parallel manipulator with redundancy[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2008, 13(4): 441 ~ 450.

5 隋立明,包钢,王祖温. 气动人工肌肉驱动关节特性研究[J]. 液压与气动,2002(3): 3 ~ 5.
Sui Liming, Bao Gang, Wang Zuwen. Study on the characteristics of joint actuating by pneumatic artificial muscle [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2002(3): 3 ~ 5. (in Chinese)

6 Vanderborght B, Verrelst B, Van Ham R, et al. Controlling a bipedal walking robot actuated by pleated pneumatic artificial muscles[J]. Robotica, 2006, 24(4): 401 ~ 410.

7 Canjun Y, Bin N, Ying C. Adaptive neuro-fuzzy control based development of a wearable exoskeleton leg for human walking power augmentation[C]//Proceedings of 2005 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Monterey California, USA, 2005: 2 457 ~ 2 463.

8 Costa N, Bezdicek M, Brown M, et al. Joint motion control of a powered lower limb orthosis for rehabilitation [J]. International Journal of Automation and Computing, 2006, 3(3): 271 ~ 281.

9 Van der Smagt P, Groen F, Klaus S. Analysis and control of a rubbertuator arm[J]. Biological Cybernetics, 1996, 75(5): 440 ~ 443.

10 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.

11 Schulz S, Pylatiuk C, Bretthauer G. A new ultralight anthropomorphic hand [C]//Proceedings of 2001 IEEE International Conference on Robotics & Automation, Seoul, Korea, 2001: 2 437 ~ 2 441.

12 钱少明,杨庆华,鲍官军,等. 基于气动柔性驱动器 FPA 的弯曲关节的基本特性研究[J]. 中国机械工程,2009, 20(24): 2 903 ~ 2 907.
Qian Shaoming, Ying Qinghua, Bao Guanjun, et al. Research on basic characteristics of bending joint based on flexible pneumatic actuator FPA [J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(24): 2 903 ~ 2 907. (in Chinese)

Cao Yi, Yang Xianqi, Chang Zongyu. Lubrication film analysis of cam mechanism based on point contact[J]. Lubrication Engineering, 2008,33(9): 62 ~ 64. (in Chinese)

7 张佐营,李志,崔增柱,等. 精密滚珠丝杠副的弹流润滑分析[J]. 机械设计与研究,2010,26(1):69 ~ 71.
Zhang Zuoying, Li Zhi, Cui Zengzhu, et al. Analysis of elastohydrodynamic lubrication of ball screw mechanism[J]. Journal of Machine Design and Research, 2010,26(1): 69 ~ 71. (in Chinese)

8 Willemain T R, Smart C N, Schwarz H F. A new approach to forecasting intermittent demand for service parts inventories [J]. International Journal of Forecasting, 2004, 20(3): 375 ~ 387.

9 Gupta U C, Rao T. On the M/G/1 machine interference model with spares [J]. European Journal of Operational Research, 1996, 89(1): 164 ~ 171.

(上接第 202 页)

13 张立彬,鲍官军,杨庆华,等. 气动柔性扭转关节静态模型[J]. 机械工程学报,2008, 44(7): 134 ~ 138.
Zhang Libin, Bao Guanjun, Yang Qinghua, et al. Static model of flexible pneumatic torsion joint [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(7): 134 ~ 138. (in Chinese)

14 鲍官军,王志恒,杨庆华,等. 气动柔性扭转关节动态特性研究[J]. 农业机械学报,2010,41(6):204 ~ 207,226.
Bao Guanjun, Wang Zhiheng, Yang Qinghua, et al. Dynamic characteristics of flexible pneumatic torsion joint [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(6):204 ~ 207,226. (in Chinese)

15 Qinghua Y, Libin Z, Guanjun B, et al. Research on novel flexible pneumatic actuator FPA[C]//Proceedings of 2004 IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics. Singapore, 2004: 385 ~ 389.

“收获机械技术及装备国际高层论坛”将在江苏大学召开

为全面贯彻落实近年来中央一号文件的有关精神,保障国家粮食安全,亚洲农业工程学会、中国农业机械学会收获加工机械分会、江苏大学预定于 2011 年 12 月上旬在江苏大学联合举办“收获机械技术及装备国际高层论坛”。会议将邀请国际、国内著名专家学者,就收获机械国际现状及发展方向、收获机械新技术及装备、智能化收获技术及收获机器人和特种收获机械等内容进行专题研讨,同期召开中国农业机械学会收获加工机械分会全体委员会议。

欢迎中国农业机械学会及各省(市、区)农业机械学会,农业部各有关单位,各省(市、区)农机化管理局(办、站)、鉴定站、推广站,农机科研院所、高等院校、生产企业,收获加工机械分会委员单位,以及致力于农业机械化发展研究等方面工作的科研、管理人员均可围绕会议主题及内容积极撰写论文,踊跃投稿,论文字数原则上不超过 5 000 字。论文请通过电子邮件发送到 jszx000@sina.com。征文截止时间为 2011 年 8 月 1 日。征集的论文经专家评审,择优编入《收获机械技术及装备国际高层论坛论文集》,优秀论文将在《亚洲农业工程期刊》、《农业机械学报》学术期刊上发表。来稿请注明“收获机械技术及装备国际高层论坛”字样。论文写作要求请参照:

http://www.j-csam.org/config/jcsam/news_category/2011-02-16/论文写作模板.doc