

气动柔性扭转关节动态特性研究*

鲍官军¹ 王志恒¹ 杨庆华¹ 邵铁锋² 高峰¹ 张立彬¹

(1. 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;

2. 中国计量学院工程训练中心, 杭州 310018)

【摘要】 基于力矩平衡原理建立了气动柔性扭转关节的基本动力学模型,基于绝热气体能量守恒方程建立了扭转关节FPA的充放气动态模型。分析了FPA初始壁厚、FPA平均半径、FPA初始角度、管接头出口面积等参数对扭转关节动态特性的影响。仿真结果表明:FPA初始壁厚、平均半径和初始角度对扭转关节转角和动态过程的影响较大,管接头出口面积对扭转关节转角和动态过程没有影响。实验结果与仿真分析基本吻合,表明建立的气动柔性扭转关节模型能够准确地描述其动态过程及特性。

关键词: 扭转关节 气动柔性驱动器 动态特性

中图分类号: TP241 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)06-0204-04

Dynamic Characteristics of Flexible Pneumatic Torsion Joint

Bao Guanjun¹ Wang Zhiheng¹ Yang Qinghua¹ Shao Tiefeng² Gao Feng¹ Zhang Libin¹

(1. Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Processing Technology, Ministry of Education,

Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China

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

Abstract

The kinetic model of flexible pneumatic torsion (FPA) joint was established based on equilibrium of moments, and the dynamic models for inflating and deflating process were built based on adiabatic gas conservation of energy. The influences of FPA initial shell-thickness, average radius, initial angle, and connector outlet area on the dynamic characteristics of torsion joint were analyzed. Simulation results showed that the initial shell-thickness, average radius and initial angle of FPA influenced both the turning-angle and dynamic process of torsion joint, while the connector outlet area had no effect on the turning-angle and dynamic process. Experimental results were close to that of simulation, which implied that the established model of flexible pneumatic torsion joint could fairly describe its dynamic process and characteristics.

Key words Torsion joint, Flexible pneumatic actuator, Dynamic characteristics

引言

气动柔性驱动器是一类以橡胶等柔顺性材料制作主要部件、以压缩气体为动力的新型驱动装置,具有柔顺性好、功率/质量比大、动作平滑、噪声低、无

污染等特点。典型的气动柔性驱动器^[1]包括McKibben型PMA(Pneumatic Muscle Actuator)、Toshiba公司开发的三自由度FMA(Flexible Microactuator)、日本冈山大学开发的旋转型气动柔性驱动器、德国Karlsruhe计算机科学应用研究中心

收稿日期: 2009-06-18 修回日期: 2009-09-03

* 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2009AA04Z209)、浙江省自然科学基金资助项目(Y1080485)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,主要从事机器人驱动及控制研究, E-mail: gjbao@zjut.edu.cn

通讯作者: 张立彬,教授,博士生导师,主要从事机器人学、设施农业装备研究, E-mail: lbz@zjut.edu.cn

研制的柔性流体驱动器和浙江工业大学研制的新型气动柔性驱动器 FPA (Flexible Pneumatic Actuator)。基于 FPA 设计了一种气动柔性扭转关节结构,本文主要分析研究扭转关节动态模型及动态特性。

1 结构与工作原理

FPA 结构如图 1 所示。与典型气动柔性驱动器相比^[2-3],FPA 最大的特点是采用弹簧而不是纤维作为约束,弹簧约束使得 FPA 在运动过程中没有附加变形和摩擦,并且提高了驱动器的刚度。由一个定盘、一个转盘和两个弧形 FPA 组成的气动柔性扭转关节,如图 2 所示。两个 FPA 的两端分别固定在转盘和定盘上,且对称分布,转盘通过轴承与下面的定盘连接,可以相对于定盘转动。当向两个 FPA 内腔充入压缩气体时,FPA 伸长变形,由于两端的约束,FPA 只能围绕转盘的旋转轴转动并推动转盘旋转一定的角度;释放 FPA 内腔的压缩气体,FPA 在橡胶弹性和弹簧的作用下恢复原状,拉动转盘回到原位,扭转关节恢复到初始状态。气动柔性扭转关节可以实现角位移输出,并且结构简单、柔顺性和安全性高。

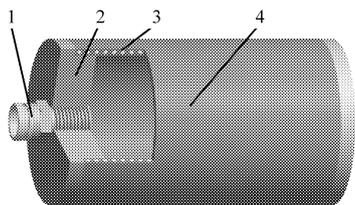


图 1 气动柔性驱动器 FPA 结构图

Fig.1 Flexible pneumatic actuator

1. 管接头 2. 端盖 3. 约束弹簧 4. 橡胶管

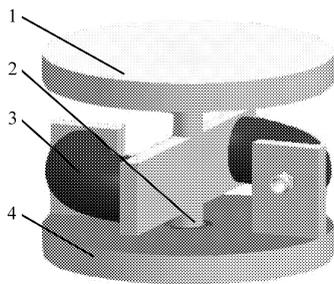


图 2 气动柔性扭转关节结构图

Fig.2 Flexible pneumatic torsion joint

1. 转盘 2. 轴承 3. FPA 4. 定盘

2 基本动力学方程

气动柔性扭转关节中转盘、旋转轴以及附属零件的质量较大,向扭转关节的 FPA 内腔充入压缩气体推动关节运动的过程中,这一部分质量对于关节动态性能的影响不能忽略。扭转关节单个 FPA 力

矩平衡分析如图 3 所示,可得扭转关节的动力学方程为

$$2M_p - 2M_a - M = J \frac{d^2\alpha}{dt^2} + \mu \frac{d\alpha}{dt} \quad (1)$$

式中 M_p ——关节内腔压力与大气压力差值在端面产生的力矩, $N \cdot m$

M_a ——橡胶管的弹性力产生的力矩, $N \cdot m$

M ——扭转关节受到的外力矩, $N \cdot m$

J ——扭转关节转盘及附属零件的转动惯量, $kg \cdot m^2$

μ ——扭转关节的粘性阻尼系数, $N \cdot m \cdot s / rad$

α ——扭转关节转角, rad

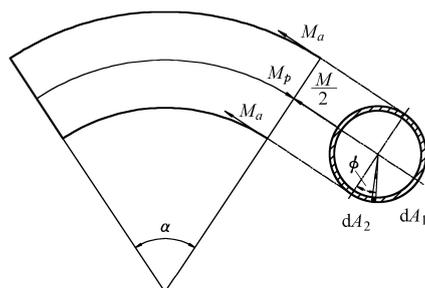


图 3 扭转关节单个 FPA 力矩平衡分析图

Fig.3 Balance analysis of FPA in torsion joint

扭转关节运动过程中有

$$M_p = \pi R_i r_i^2 (p - p_{atm}) \quad (2)$$

$$M_a = 2\pi E_t R_i r_i t_i \left(1 - \frac{L_t}{R_i \alpha + L_t}\right) \quad (3)$$

式中 R_i ——扭转关节旋转半径, mm

r_i ——扭转关节 FPA 平均半径, mm

p ——扭转关节 FPA 内腔压力, MPa

p_{atm} ——大气压力, $0.1 MPa$

E_t ——扭转关节 FPA 弹性模量, MPa

t_i ——扭转关节 FPA 初始壁厚, mm

L_t ——扭转关节 FPA 初始长度, mm

3 扭转关节 FPA 充放气模型

扭转关节 FPA 充气过程能量守恒方程为

$$\frac{dp}{dt} = \frac{kRT_s q_{m1}}{V_i} - \frac{kp dV_i}{V_i dt} \quad (4)$$

式中 k ——空气绝热指数

R ——空气气体常数, $N \cdot m / (kg \cdot K)$

T_s ——充气气源温度, K

q_{m1} ——进入 FPA 内腔的气体质量流量

扭转关节单个 FPA 内腔容积为

$$V_i = \pi r_i^2 (L_t + \alpha R_i) \quad (5)$$

则

$$\frac{dV_i}{dt} = \pi R_i r_i^2 \frac{d\alpha}{dt} \quad (6)$$

充气过程中,从通气管接头端口进入关节 FPA

内腔的气体质量流量方程为

$$q_{m1} = Ap_s \sqrt{\frac{1-b}{RT_s}} \varphi(\sigma_1) \quad (7)$$

其中
$$\sigma_1 = \frac{p}{p_s} \quad (8)$$

$$\varphi(\sigma_1) = \begin{cases} \sqrt{1 - \left(\frac{\sigma_1 - b}{1 - b}\right)^2} & (\sigma_1 > b) \\ 1 & (\sigma_1 \leq b) \end{cases} \quad (9)$$

式中 A ——管接头出口面积, mm^2

p_s ——充气气源压力, MPa

b ——临界压力比

扭转关节 FPA 放气过程能量守恒方程为

$$\frac{dp}{dt} = \frac{kRTq_{m2}}{V_t} - \frac{kp dV_t}{V_t dt} \quad (10)$$

FPA 绝热放气过程是等熵过程, 所以内腔气体温度为

$$T = T_0 \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (11)$$

式中 T_0 ——放气气源温度, K

p_0 ——放气初始压力

放气过程中, 经由管接头从 FPA 内腔流出气体的质量流量方程为

$$q_{m2} = Ap \sqrt{\frac{1-b}{RT}} \varphi(\sigma_2) \quad (12)$$

其中
$$\sigma_2 = \frac{p_{\text{atm}}}{p} \quad (13)$$

$$\varphi(\sigma_2) = \begin{cases} \sqrt{1 - \left(\frac{\sigma_2 - b}{1 - b}\right)^2} & (\sigma_2 > b) \\ 1 & (\sigma_2 \leq b) \end{cases} \quad (14)$$

4 扭转关节动态特性仿真分析

4.1 充放气动态过程仿真

通过式(1)~(14)应用 Matlab/Simulink 动态仿真工具箱对扭转关节的动态过程进行仿真分析, 仿真参数见表1。充气过程给扭转关节 FPA 内腔输入 0.1~0.6 MPa 压力阶跃信号, 放气过程给扭转关节 FPA 内腔输入 0.6~0.1 MPa 压力阶跃信号, 气动柔性扭转关节的充放气过程动态仿真结果如图4、5所示。

由图4可以看出扭转关节 FPA 的充放气动态过程因其转盘转动惯量较大而对压力阶跃信号的响应较慢, 并且充气过程和放气过程动态响应特性基本一样, 二者的超调量、调整时间相差无几, 放气过程动态响应的上升时间、峰值时间较充气过程稍短。就图4、5所示的充气或放气单一过程来看, 扭转关

表1 扭转关节动态仿真参数

Tab.1 Parameters of dynamic simulation

参数	数值
扭转关节 FPA 平均半径 r_t/mm	6
扭转关节 FPA 初始壁厚 t_t/mm	2
扭转关节 FPA 初始长度 L_t/mm	35
扭转关节 FPA 初始角 $\beta/(\circ)$	90
扭转关节粘性阻尼系数 $\mu/\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{rad}^{-1}$	0.1
临界压力比 b	0.35
空气绝热指数 k	1.4
空气气体常数 $R/\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	287
充气气源温度 T_s/K	293
放气气源温度 T_0/K	293
管接头出口面积 A/mm^2	4.9
扭转关节 FPA 弹性模量 E_t/MPa	2.0
大气压力 $p_{\text{atm}}/\text{MPa}$	0.1
充气气源压力 p_s/MPa	0.6
放气初始压力 p_0/MPa	0.6
扭转关节转盘及附属零件转动惯量 $J/\text{kg}\cdot\text{m}^2$	0.003
扭转关节受到的外力矩 $M/\text{N}\cdot\text{m}$	0

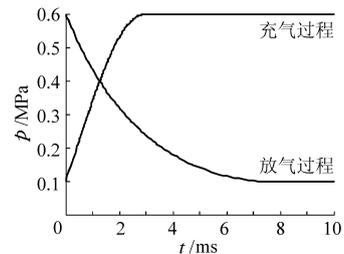


图4 扭转关节充放气过程压力响应曲线
Fig.4 Response of pressure of torsion joint inflating and deflating

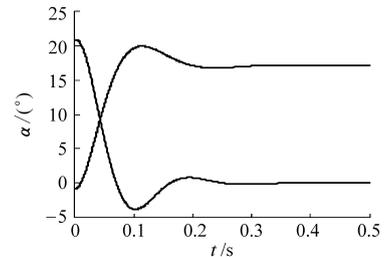


图5 扭转关节充放气过程转角响应曲线
Fig.5 Response of tortile angle of torsion joint inflating and deflating

节 FPA 的压力响应比扭转关节转角响应要快得多, 时间相差一个数量级, 相对而言, FPA 内腔的压力在瞬间建立, 而关节转角需要较长的上升和调整时间。

4.2 FPA 初始壁厚对动态特性的影响

FPA 初始壁厚的变化, 对于扭转关节 FPA 内腔压力的动态响应几乎没有影响, 各条压力曲线重合; 而关节转角的响应曲线变化比较明显, 壁厚较小时,

关节可以得到较大的转角,并且转角的响应曲线没有超调,但上升时间长,壁厚较大时,关节转角变小,响应加快,但是有超调和轻微振荡现象,如图 6 所示。

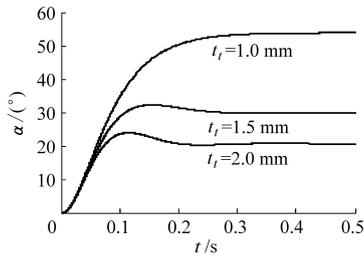


图 6 不同 FPA 初始壁厚时的扭转关节转角动态过程

Fig.6 Effect of initial tube thickness on tortile angle of torsion joint

4.3 FPA 平均半径对动态特性的影响

FPA 平均半径不同时,扭转关节压力响应和转角响应曲线如图 7、图 8 所示。增大 FPA 平均半径,即增大了 FPA 内腔容积,则在气体质量流量相同的情况下,FPA 内腔压力的建立过程变得缓慢,如图 7 所示;由图 8 可知,FPA 平均半径越大,内腔压力在端面产生的力矩越大,则得到的关节转角越大,但是转角响应的超调量也随之增大。从结构上分析,FPA 平均半径增大,必然使得扭转关节整体尺寸增大,所以 FPA 平均半径不宜过大。

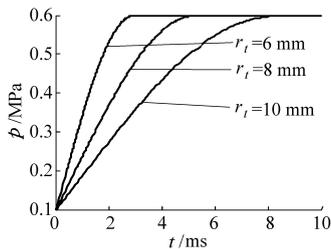


图 7 不同 FPA 平均半径时的扭转关节内腔压力动态过程

Fig.7 Effect of average radius on the pressure inside torsion joint

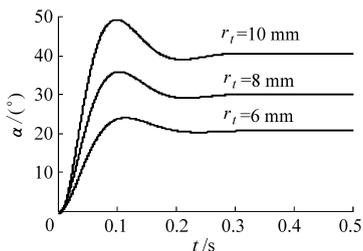


图 8 不同 FPA 平均半径时的扭转关节转角动态过程

Fig.8 Effect of average radius on tortile angle of torsion joint

4.4 FPA 初始角度对动态特性的影响

在 FPA 初始长度一定的条件下,其初始角度的变化不改变其内腔容积大小,故对其内腔压力的动态响应过程没有影响;由图 9 所示的关节转角响应曲线可知,FPA 的初始角度越大,关节的转角越大,

并且超调量减小,振荡减弱,但是上升时间增大。

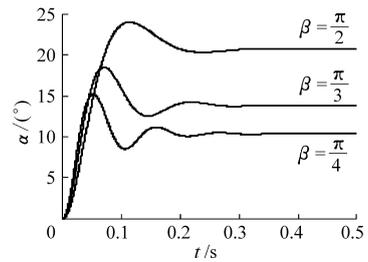


图 9 不同初始角度时的扭转关节转角动态过程

Fig.9 Effect of initial angle on tortile angle of torsion joint

4.5 管接头出口面积对动态特性的影响

减小管接头出口面积,即减小了气体的质量流量,与 4.3 节中增大 FPA 平均半径而增大 FPA 内腔容积的效果一样,气体质量流量的减小使得扭转关节 FPA 内腔压力的建立过程缓慢,如图 10 所示。但是管接头出口面积的大小对于关节转角的动态响应几乎没有影响。

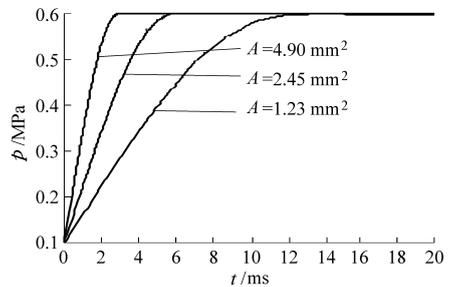


图 10 不同管接头出口面积时的扭转关节内腔压力动态过程

Fig.10 Effect of connector's outlet area on the pressure inside torsion joint

5 实验分析

根据表 1 所示气动柔性扭转关节主要结构参数制作关节样机,并进行了充气过程实验,与仿真结果(图 5 充气过程)的对比如图 11 所示。仿真曲线上升时间为 0.09 s,最大超调量 5.83%,实验结果上升时间为 0.22 s,无超调。实验结果与仿真分析的平均稳态误差为 12.25%。可见仿真曲线与实验结果趋势一致、动态性能参数接近,说明所建立的关节动

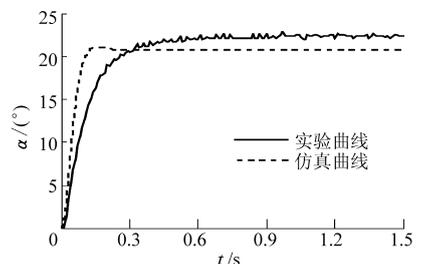


图 11 仿真与实验结果对比

Fig.11 Comparison of simulation and experimental result

4 结论

(1) 在对深冲钢激光拼焊板焊接温度场进行动态模拟的基础上,建立了焊缝形状预测模型。为了保证焊接温度场模拟时的节点选取具有更高精度,在节点数据选取过程中提出了一种首尾节点控制方法。运用该模型所得预测焊缝形状与实际焊缝形状吻合度高,最大相对误差为 7.63%。

(2) 利用偏最小二乘回归方法建立晶粒尺寸预测模型实现了对焊缝及其热影响区晶粒尺寸预测,所得到的焊缝及其热影响区晶粒尺寸的预测精度均达 95%,焊缝区晶粒尺寸相对误差为 0.098% ~ 2.995%,热影响区晶粒尺寸预测相对误差为 0.039% ~ 4.124%。充分表明所建模型与实际值一致性良好,验证了该预测模型的合理性及适用性。

参 考 文 献

- 1 Grf T, Stauer H. Laser hybrid welding drivers VW improvements[J]. *Welding Journal*, 2004, 83(9): 43 ~ 47.
- 2 Farzadi A, Serajzadeh S, Kokabi A H. Prediction of solidification behaviour of weld pool through modelling of heat transfer and fluid flow during gas tungsten arc welding of commercial pure aluminium[J]. *Materials Science and Technology*, 2008, 24(6): 1427 ~ 1432.
- 3 Zhang Z L, Silvanus J, Li H K, et al. Sensitivity analysis of history dependent material mechanical models for numerical simulation of welding process[J]. *Science and Technology of Welding & Joining*, 2008, 13(8): 422 ~ 429.
- 4 谭真,郭广文. 工程合金热物性[M]. 北京:冶金工业出版社,1994.
- 5 Li Xincheng, Luo Guanghong, Zhu Weixing, et al. The design and application of microstructure control system applied to vehicles using sheet[C]//International Technology & Innovation Conference 2006, 2006, (CP524): 1034 ~ 1038.
- 6 陈炜,李卫国,杨继昌,等. 曲线焊缝布置对激光拼焊板成形性能的影响[J]. *农业机械学报*, 2008, 39(9): 170 ~ 173.
Chen Wei, Li Weiguo, Yang Jichang, et al. Influence of non-linear weld line arrangement on laser tailor-welded blanks forming performances[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2008, 39(9): 170 ~ 173. (in Chinese)

(上接第 207 页)

态模型较为准确,适用于第 4 节各项动态特性仿真分析。实验结果响应时间滞后、没有超调是由于实际关节样机的粘性阻尼较大;仿真曲线与实验数据阶跃响应稳态存在误差的原因是仿真采用的扭转关节 FPA 弹性模量与实际系统的弹性模量存在误差。

程建立了气动柔性扭转关节的动态模型,描述该关节的充放气动态过程和特性。

(2) 仿真分析表明 FPA 初始壁厚、平均半径和初始角度对扭转关节转角大小和动态过程影响较大,管接头出口面积对扭转关节转角和动态过程没有影响。

(3) 实验证明了所建立的气动柔性扭转关节动态模型和动态特性仿真分析的准确性。

6 结论

(1) 基于力矩平衡原理和绝热气体能量守恒方

参 考 文 献

- 1 张立彬,鲍官军,杨庆华,等. 气动柔性驱动器及其在灵巧手中的应用研究综述[J]. *中国机械工程*, 2008, 19(23): 2891 ~ 2897.
Zhang Libin, Bao Guanjun, Yang Qinghua, et al. Review on flexible pneumatic actuator and its application in dexterous hand [J]. *China Mechanical Engineering*, 2008, 19(23): 2891 ~ 2897. (in Chinese)
- 2 Yang Qinghua, Zhang Libin, Bao Guanjun. Research on novel flexible pneumatic actuator FPA [C]//2004 Proceedings of IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics, Singapore, 2004: 385 ~ 389.
- 3 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)