

基于高速开关阀的气动人工肌肉轨迹跟踪控制仿真

谢胜龙 刘海涛 梅江平 王攀峰

(天津大学机构理论与装备设计教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要: 针对基于高速开关阀的气动人工肌肉位置伺服控制系统的非线性与时变性, 设计了基于气动人工肌肉实验模型的 PID 反馈控制器, 实现气动人工肌肉的高精度运动轨迹跟踪控制。首先, 通过实验建模得到气动人工肌肉静态特性的实验模型, 然后基于理想气体多变方程, 建立可有效描述气动人工肌肉动态特性的数学模型, 利用 Sanville 流量公式建立流经高速开关阀阀口的气体流量方程, 并采用脉冲信号调制法生成 PWM 信号, 进而控制高速开关阀占空比。在此基础上, 借助 PID 反馈控制器建立气动人工肌肉气压与轨迹跟踪的控制模型, 并采用 Simulink 对所提出的气压和轨迹跟踪控制方法进行数值仿真。结果表明, 所建立的控制模型能够精确地跟踪期望气压和运动轨迹, 从而验证了控制模型和控制方案的精确性和可行性, 为实现气动人工肌肉高精度轨迹跟踪控制提供了有效手段。

关键词: 开关阀; 气动人工肌肉; 轨迹跟踪; 反馈控制

中图分类号: TH122 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)01-0368-07

Simulation of Tracking Control of Pneumatic Artificial Muscle Based on Fast Switching Valves

XIE Shenglong LIU Haitao MEI Jiangping WANG Panfeng

(Key Laboratory of Mechanism Theory and Equipment Design, Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Due to the problem of nonlinear and time-varying exists in the model of the pneumatic artificial muscle (PAM) trajectory tracking control system, the modeling of the trajectory tracking control of PAM driven by fast switching valves was detailed in order to enhance the trajectory tracking control accuracy of PAM and reduce the cost of control scheme. A feedback PID controller based on the experimental model of PAM was proposed to achieve its high accuracy trajectory tracking control. The control system was divided into three subsystems, which were pneumatic artificial muscle, fast switching valve and the PWM signal. Firstly, the static model of PAM was established by the isometric experiment, and then the dynamic characteristic model of PAM was developed based on the polytropic equation, in which the air mass flow rate through the fast switching valve was evaluated by using the Sanville equation. The PWM signal that was used to control the fast switching valves was generated referring to the pulse signal modulation method. Sequentially, the pressure and trajectory tracking control models of PAM were derived by means of feedback PID controller, based on which the simulations of pressure and trajectory tracking control were implemented in the environment of Matlab/Simulink. The results indicated that the control model can achieve satisfactory performance and accuracy, which validated the feasibility of the proposed model and control scheme. Thus, it provided an effective approach for high accuracy trajectory tracking control of PAM.

Key words: fast switching valve; pneumatic artificial muscle; trajectory tracking; feedback control

引言

气动人工肌肉 (Pneumatic artificial muscle,

PAM), 因具有结构简单、质量轻、输出力/自重比大、柔性大等优点, 在农业机器人关节驱动中得到了越来越多的应用^[1]。然而, 由于其自身的结构特

收稿日期: 2016-06-01 修回日期: 2016-08-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51405331)

作者简介: 谢胜龙(1988—), 男, 博士生, 主要从事机器人理论与应用研究, E-mail: sleepinglion@tju.edu.cn

通信作者: 刘海涛(1981—), 男, 副教授, 主要从事机构学与机器人学研究, E-mail: liuht@tju.edu.cn

点,使其在使用过程中产生迟滞^[2]、门槛气压效应^[3]、蠕变^[4]、柔顺性^[5]和闭环带宽低^[6]等一系列现象,呈现了强非线性与时变性,给其精确的位置控制带来极大的难度。目前,气动伺服控制系统主要采用比例阀和开关阀^[7]。比例阀具有高控制精度和线性行为的优点,以往研究中多采用比例阀来控制气动人工肌肉,但是其价格昂贵、结构复杂;高速开关阀^[8]由于具有开关速度快和结构简单等特点,使得气动控制系统具有频响较高、成本低廉和对环境要求不高等优点。因此,使用成本低、体积小的高速开关阀代替比例阀,研究基于高速开关阀的气动人工肌肉位置伺服控制正成为当前气动人工肌肉控制技术研究方向的一个方向。

KIMURA 等^[9]采用反馈线性化控制方法对气动人工肌肉系统实施控制,并通过实验验证了该方法的有效性。REPPERGER 等^[10]基于三元素模型,在反馈线性化的基础上引入变结构控制器对气动人工肌肉的轨迹跟踪控制进行了研究。但反馈线性化方法要求模型精确且全部状态必须可测,当有不确定参数或者未建模动态特征时,不能确保控制系统的鲁棒性。AMATO 等^[11]采用鲁棒控制策略研究了以气动人工肌肉为驱动器的机械臂轨迹跟踪控制。ZHU 等^[12]采用自适应鲁棒控制实现了在无压力传感器时气动人工肌肉并联关节的轨迹跟踪,但其仅可补偿较大且缓变的系统不确定量,不能有效补偿快速变化的系统不确定量。文献[13]采用滑模控制器对气动人工肌肉进行了轨迹跟踪控制,并通过阶跃信号和正弦信号进行了实验验证,但由于系统惯性、延迟和测量误差等因素,滑模控制在滑动模式下会产生高频振动,且耗气量较大。

本文针对基于高速开关阀的气动人工肌肉位置伺服系统,提出采用基于实验模型的反馈 PID 控制器实现气动人工肌肉高精度运动轨迹跟踪的控制方法。首先,通过实验建模得到气动人工肌肉的实验模型;然后,基于理想气体多变方程建立其动态特性的数学模型;利用 Sanville 流量公式建立流经高速开关阀阀口的气体流量方程;最后,通过整合气动回路中各子系统的数学模型,建立较为完善的气动人

工肌肉轨迹跟踪控制数值仿真模型。在此基础上,对控制系统进行气压与轨迹跟踪控制仿真,旨在为实现气动人工肌肉的高精度轨迹跟踪控制提供有效手段。

1 系统描述

图 1 为气动人工肌肉轨迹跟踪原理图。相关元器件型号如表 1 所示。其中,气源经过减压阀和储气罐连接高速开关阀组,高速开关阀 1 为进气阀(以下简称进气阀),高速开关阀 2 为排气阀(以下简称排气阀)。当高速开关阀通电时,阀口打开;当高速开关阀断电时,阀口关闭。开关阀组通过进气和排气控制气动人工肌肉的伸缩。具体工作原理如下:高速开关阀的初始状态均为断电状态,气动人工肌肉内腔与大气压相通,处于自然状态;当进气阀通电且排气阀断电时,气源中的高压气体经储气罐进入气动人工肌肉内腔,随着进气量的增加,气动人工肌肉在轴向不断收缩;当气动人工肌肉收缩至期望位置时,进气阀和排气阀同时断电,此时高压气体滞留在气动人工肌肉内腔,气动人工肌肉保持当前状态;当进气阀断电且排气阀通电时,气动人工肌肉内腔高压气体经排气阀阀口由消音器排出。

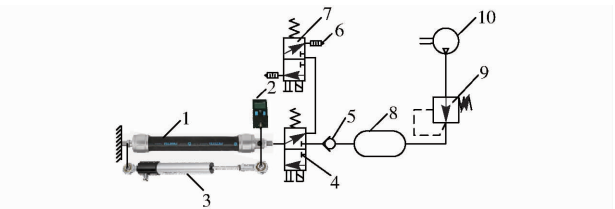


图 1 气动人工肌肉轨迹跟踪控制原理图
Fig. 1 Scheme of pneumatic muscle tracking control
1. 气动人工肌肉 2. 气压传感器 3. 位移传感器 4. 高速开关阀 1 5. 截止阀 6. 消音器 7. 高速开关阀 2 8. 储气罐 9. 节流阀 10. 气源

在采用 PWM 信号控制高速开关阀的过程中,当气动人工肌肉的理想收缩量与位移传感器实际测得的位移信号偏差较大时,为使气动人工肌肉迅速地到达设定位置,相应的高速开关阀应完全打开;当气动人工肌肉接近设定位置时,高速开关阀 PWM 控制信号占空比随位移偏差相应改变,当位移偏差

表 1 各元部件型号

Tab. 1 Components of system

元件	型号	主要参数	厂商
气动人工肌肉	DMSF-20-500N	长 500 mm, 内径 20 mm	费斯托
位移传感器	TEX-0150-415-002-205	量程 150 mm	Novotechnik
气压传感器	SDE1-D10-G2-WQ4-L-PU-M8-G5	最大测量气压 1 MPa	费斯托
高速开关阀	MHE2-MS1H-3/2G-M7-K	3 位 2 通, 常闭, 响应速度 2 ms	费斯托
数据采集卡	PCI-6254	32 路模拟量输入, 48 路模拟量输出	美国 NI 公司

小于设定范围(死区)时,为避免气动人工肌肉在设定位置附近频繁地振荡,认为气动人工肌肉到达设定位置,此时关闭相应的高速开关阀,使气动人工肌肉保持在当前位置。

2 系统建模

2.1 气动人工肌肉

2.1.1 气动人工肌肉静态模型

气动人工肌肉的静态特性模型反映的是气动人工肌肉的拉力与其内腔气压及长度间的函数关系。目前,常用的气动人工肌肉静态特性模型有:Chou 模型^[14]和 Tondu 模型^[15]。由于收缩率 ε 比编织角 α 更易于通过实验测得,因此实际应用中多采用 Tondu 公式或其修正公式。气动人工肌肉的 Tondu 模型^[16]为

$$F = \pi r_0^2 p [a(1 - \varepsilon)^2 - b]$$
 (1)

其中
$$a = \frac{3}{\tan^2 \alpha} \quad b = \frac{1}{\sin^2 \alpha} \quad \varepsilon = \frac{L_0 - L}{L_0}$$

式中 r_0 ——气动人工肌肉在初始状态下的半径
 L_0 ——气动人工肌肉在初始状态下的长度
 L ——气动人工肌肉充气收缩后的长度
 p ——气动人工肌肉内腔气压

式(1)表明气动人工肌肉的拉力与气压 p 呈正比,与收缩率 ε 呈非线性关系。

由于气动人工肌肉某些内部结构参数数值难以准确获取,且气动人工肌肉几何模型在低压下精度较差,同时现有的理论模型难以完全模拟气动人工肌肉的静态特性,使得实现气动人工肌肉的精确位置控制比较困难。为此,本文采用实验方法建立气动人工肌肉的静态特性模型,即利用实验数据拟合气动人工肌肉收缩力与其内腔气压及位移之间的函数关系。具体实验方案如图 2 所示。



图 2 气动人工肌肉等长实验装置
Fig. 2 Isometric setup of pneumatic artificial muscle

气动人工肌肉在不同长度下的充气压力与收缩力之间的关系曲线如图 3 所示。

从图 3 可以看出,在不同长度下,气动人工肌肉的收缩力与气压呈正比。因此,可将气动人工肌肉的收缩力与气压以及气动人工肌肉的长度表示

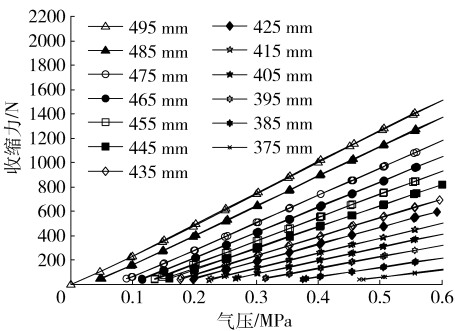


图 3 气动肌肉收缩力与气压之间关系
Fig. 3 Relations between pressure and contracting force
为^[17]

$$F_{\text{const}} = a(x)p + b(x)$$
 (2)

其中
$$a(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2$$
 (3)

$$b(x) = b_0 + b_1x + b_2x^2 + b_3x^3$$
 (4)

式中 F_{const} ——气动人工肌肉收缩力
 x ——气动人工肌肉长度
 $a(x)$ ——直线斜率
 $b(x)$ ——直线截距
 a_i, b_j ——待拟合的参数

根据测得的实验数据,利用 Matlab 曲线拟合工具箱得到式(3)与式(4)中的系数 a_i 和 b_j ,拟合结果为

$$\begin{cases} a(x) = 0.000\,953x^2 + 0.797\,9x - 370.7 \\ b(x) = 0.000\,456\,1x^3 - 0.566\,8x^2 + 234.6x - 32\,560 \end{cases}$$
 (5)

根据气动人工肌肉的数学模型,在 Simulink 中搭建其仿真模型如图 4 所示。给定负载 F 和气压 p ,便可得到气动人工肌肉长度随其内腔气压的变化曲线。

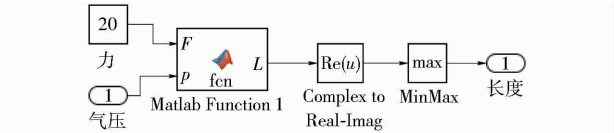


图 4 气动人工肌肉静态特性仿真图
Fig. 4 Static characteristic simulation diagram of pneumatic artificial muscle

2.1.2 气动人工肌肉动态模型

由于气动人工肌肉乳胶管由弹性尼龙材料构成,且在气动人工肌肉伸缩过程中仅透过很少的热量,故可将气动人工肌肉的伸缩过程视为等温或绝热过程。由理想气体多变方程可得到气动人工肌肉体积与内腔气压之间的函数关系^[18]

$$p \left(\frac{V}{m} \right)^k = \text{const}$$
 (6)

对式(6)全微分可得

$$\dot{p} = \frac{k}{V}(\dot{m}RT - p\dot{V}) \tag{7}$$

相应的 Simulink 模块如图 5 所示。模块输入量为流进气动人工肌肉的气体质量流量,当假设气动人工肌肉体积恒定时,式(7)中第 2 项为 0,经积分后即可得到气动人工肌肉的内腔气压。

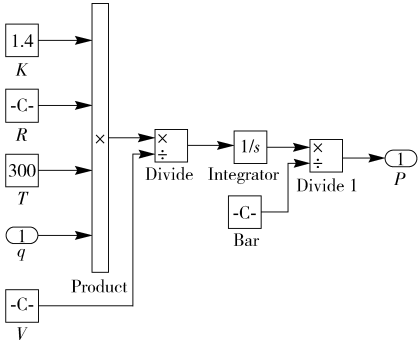


图 5 气动人工肌肉动态特性仿真图

Fig.5 Dynamic characteristic simulation diagram of pneumatic muscle

2.2 高速开关阀

气体通过阀口的过程十分复杂,通常采用 Sanville 流量公式^[19]进行描述,即

$$\dot{m} = \begin{cases} A \frac{p_u}{\sqrt{T_u}} \sqrt{\frac{2k}{R(k-1)}} \left[\left(\frac{p_d}{p_u} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_d}{p_u} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right] & \left(\frac{p_d}{p_u} > 0.528 \right) \\ A \frac{p_u}{\sqrt{T_u}} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}} \sqrt{\frac{2k}{R(k+1)}} & \left(\frac{p_d}{p_u} \leq 0.528 \right) \end{cases} \tag{8}$$

式中 $\dot{m}$ ——通过光滑收缩喷管的气体质量流量
 A ——喷管喉部的节流面积
 p_u, p_d ——收缩喷管上游、下游绝对压力
 T_u ——收缩喷管上游气体热力学温度
 k ——比热比,空气为 1.4
 R ——理想气体常数,取 287 N·m/(kg·K)

式(8)将阀口的气体流动过程近似为理想气体通过收缩喷管的一维等熵流动。当开关阀阀口全开时,可将其等效为光滑的收缩喷管。保持上游压力和温度不变,当 $p_d/p_u \leq 0.528$ 时,气体进入壅塞流态,该值称为临界压力比^[20]。

PWM 基频范围在 100 ~ 180 Hz,当占空比相同时,周期或频率的变化对气体平均质量流量 $\dot{m}$ 的影响很小,可忽略不计^[20]。因此,可将通过高速开关阀的平均质量流量视为其占空比的函数。高速开关阀的阀口面积采用一个 PWM 信号周期内的平均有效截面积代替,可得

$$\frac{\dot{m}}{m} = \begin{cases} \mu A_m \frac{p_u}{\sqrt{T_u}} \sqrt{\frac{2k}{R(k-1)}} \left[\left(\frac{p_d}{p_u} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_d}{p_u} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right] & \left(\frac{p_d}{p_u} > 0.528 \right) \\ \mu A_m \frac{p_u}{\sqrt{T_u}} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}} \sqrt{\frac{2k}{R(k+1)}} & \left(\frac{p_d}{p_u} \leq 0.528 \right) \end{cases} \tag{9}$$

式中 μ ——高速开关阀 PWM 信号的占空比
 A_m ——阀口最大有效截面积

由文献[21]可知,MHE2-MS1H-3/2G-M7-K 型气动人工肌肉的阀口最大面积 A_m 为 $1.8194 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ 。

由于高速开关阀流量特性方程较为复杂,本文采用 Simulink 中的 Function 模块进行仿真(图 6)。该模块的输入量为阀口上游气压 p_{up} 、下游气压 p_{down} 、气动人工肌肉内腔气压 p_1 、空气温度 t 和占空比 μ ,输出量为平均质量流量 $\dot{m}$ 。当气动人工肌肉充气时, $\mu > 0$ 且 p_{up} 为气源气压, p_{down} 为气动人工肌肉内腔气压, $p_{down} = p_1$;当气动人工肌肉放气时, $\mu < 0$ 且 p_{up} 为气动人工肌肉内腔气压, $p_{up} = p_1$, p_{down} 为大气压,以此来模拟气动人工肌肉的充放气过程。

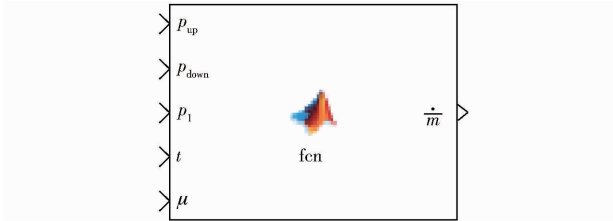


图 6 开关阀流量特性模块

Fig.6 Mass flux characteristics of on/off valve

2.3 PWM 信号

Simulink 中有多种产生 PWM 信号的方法,本文采用文献[22]中介绍的脉冲信号调制法产生 PWM 信号。该方法具有方便快捷、线性关系明确等优点。其步骤如下:首先产生占空比为 50% 的标准脉冲信号序列,然后通过偏置与积分的方法得到标准的三角波信号,最后通过对三角波信号进行偏置来获得所需的 PWM 信号。采用该方法建立的仿真模型如图 7 所示。

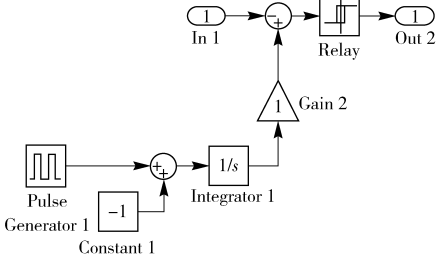


图 7 PWM 信号生成仿真图

Fig.7 Simulation diagram of PWM generation

Pulse Generator 模块用于产生幅值为 2, 占空比为 50% 的方波, 减 1 偏置后积分, 即可生成用于调制 PWM 波的三角波调制信号。将输入信号与三角波调制信号之差输入 Relay 模块, 当输入大于 0 时, Relay 输出 1 (模拟充气过程); 当输入小于 0 时, Relay 输出 -1 (模拟放气过程), 即可将输入信号调制成控制高速开关阀的 PWM 信号。

3 系统仿真

采用 PID 反馈控制进行气动人工肌肉气压与轨迹跟踪控制的仿真。根据期望信号与反馈信号的差值, 利用 PID 控制器得出高速开关阀占空比信号, 从而控制气动人工肌肉的进气量与排气量, 进而控制其内部气压与位移。

PID 反馈控制的数学模型为

u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \tag{10}

式中 e(t)——输入信号 u(t)——输出信号
K_p——比例系数 K_i——积分系数
K_d——微分系数

比例系数用于设置信号差值的放大系数, 适当提高比例系数, 能够加快系统响应性; 为了消除引入比例系数所产生的超调和震荡, 引入积分系数, 使经过比例系数放大后的信号在积分时间内逐渐增大 (或减小), 抑制振荡的产生, 消除稳态误差。微分系数根据差值信号变化的速率, 提前给出一个调节动作, 从而加快系统的动作速度, 减少调节时间; 且能够克服因积分时间过长而使系统响应滞后的缺陷。

3.1 气压控制

气压控制是气动人工肌肉轨迹跟踪控制的基础, 并可以初步验证所建模型的准确性。气压跟踪控制系统原理图与仿真模型如图 8、9 所示。

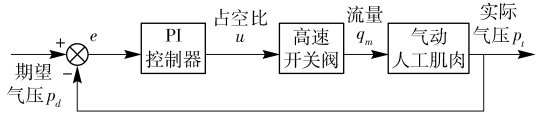


图 8 气压跟踪控制原理图

Fig. 8 Scheme of pressure tracking control

输入期望气压 p_d, 与反馈回的实际气压 p_i 相减, 并经过 PID 控制器调节得到高速开关阀的占空比信号, 通过占空比信号中高电平的时间调节高

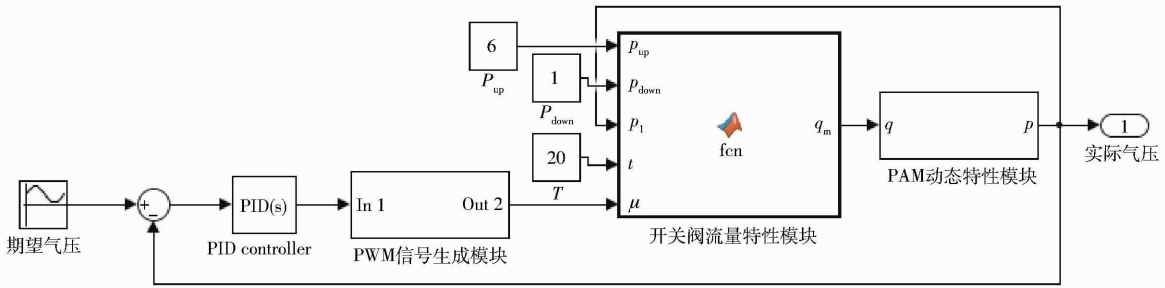


图 9 气压跟踪控制系统仿真模型

Fig. 9 Simulation model of pressure tracking control system

速开关阀阀口大小, 从而调节流经高速开关阀进入气动人工肌肉内腔的空气流量, 进而实现调节气动人工肌肉内腔气压。这里分别输入正弦波气压和方波气压信号, 给定 PID 参数 P = 1.5、I = 0.000 01 和 D = 0.000 01, 仿真结果如图 10 ~ 13 所示。

其中, 图 10 和图 12 分别为气动人工肌肉内腔

气压对正弦气压和方波气压的跟踪效果; 图 11 和图 13 分别为正弦波和方波的气压跟踪误差。图 13 中方波气压跟踪误差的突变是由于在此处期望气压与仿真气压存在微小不同步所导致。可见所建模型对正弦信号跟踪效果非常理想, 从而验证了模型的精确性。

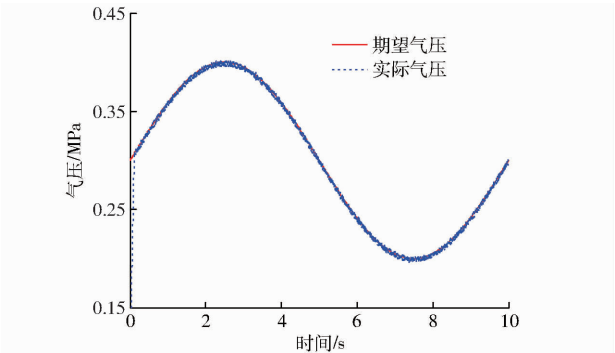


图 10 正弦波气压跟踪

Fig. 10 Sinusoidal pressure tracking

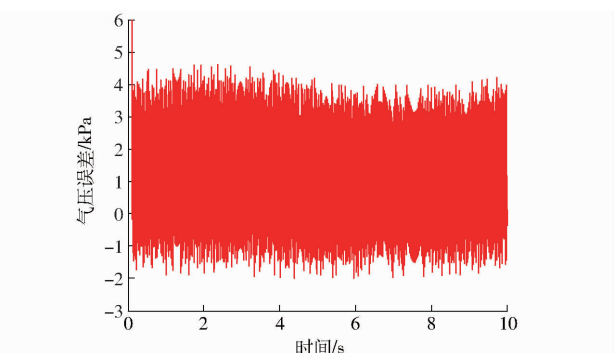


图 11 正弦波气压跟踪误差

Fig. 11 Error of sinusoidal pressure tracking

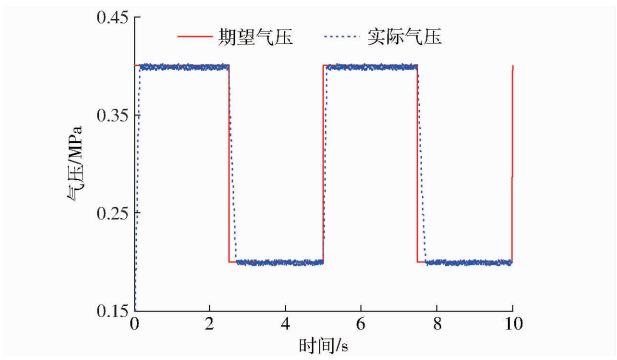


图 12 方波气压跟踪

Fig. 12 Square wave pressure tracking

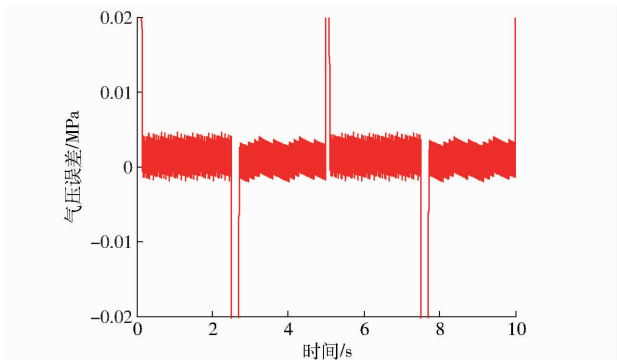


图 13 方波气压跟踪误差

Fig. 13 Error of square wave pressure tracking

3.2 轨迹跟踪控制

气动人工肌肉轨迹跟踪控制系统原理图和仿真模型分别如图 14 和图 15 所示。

输入期望位移,与反馈回的位移相减,并经过 PID 控制器调节得到高速开关阀占空比信号,从而

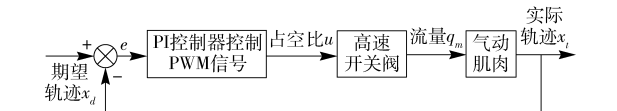


图 14 轨迹跟踪控制系统原理图

Fig. 14 Scheme of trajectory tracking control

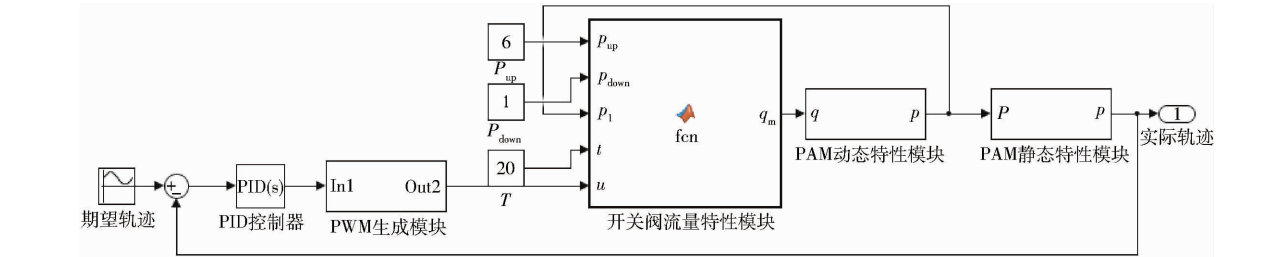


图 15 气动人工肌肉轨迹跟踪控制系统仿真模型

Fig. 15 Simulation model of trajectory tracking control

调节流经高速开关阀进入气动人工肌肉内腔的空气流量,进而调节气动人工肌肉内腔的气压及其长度。设置仿真类型为定步长仿真,步长为 0.001 s,仿真时间为 10 s,求解器为 ODE4,PWM 信号周期为 20 ms。分别跟踪频率为 0.2 Hz,幅值为 10 mm 的正弦波信号和方波信号。被跟踪的正弦波与方波曲线为

$$f(t) = 10\sin(0.4\pi t) + 450 \tag{11}$$

$$g(t) = \begin{cases} 460 & (0 < t < nT + T/2) \\ 440 & (nT + T/2 < t < (n+1)T) \end{cases} \tag{12}$$

式中 $f(t)$ ——正弦波信号
 $g(t)$ ——方波信号
 T ——方波信号周期

给定 PID 参数 $P = 0.08$ 、 $I = 0.000\ 001$ 和 $D = 0.000\ 01$,仿真结果如图 16 ~ 19 所示。

其中,图 16 和图 18 分别为气动人工肌肉对正弦和方波轨迹的跟踪效果;图 17 和图 19 分别为正弦波和方波的轨迹跟踪误差。类似地,图 19 中方波位移跟踪误差的突变是由于在此处期望位移与仿真位移存在微小的不同步所导致。由图 16 ~ 19 可见,无论输入信号为正弦波信号或是方波信号,气动人工肌肉轨迹跟踪控制的跟踪效果均较好,误差整体分布都较为均匀,平均误差约为 0.5 mm,最大误差

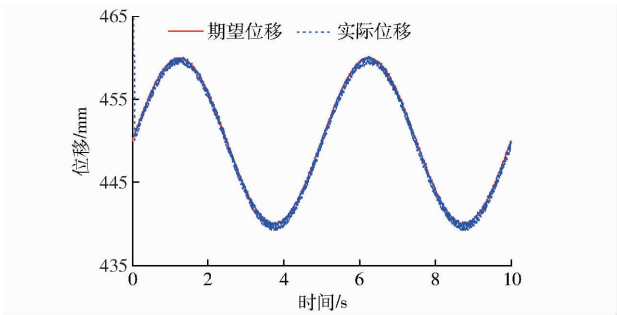


图 16 正弦波轨迹跟踪

Fig. 16 Sinusoidal trajectory tracking

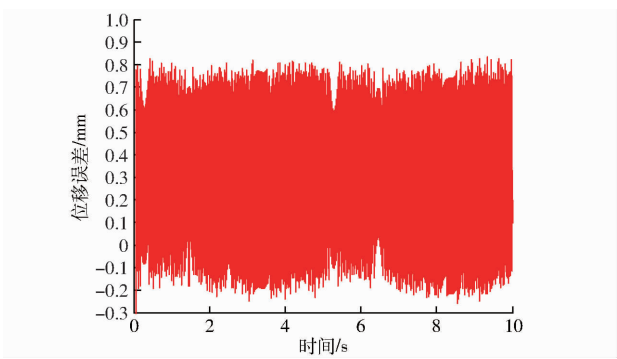


图 17 正弦波轨迹跟踪误差

Fig. 17 Errors of sinusoidal trajectory tracking

仅为 0.8 mm。可见仿真模型的精度较高,从而验证了所建立的控制系统数学模型的正确性。

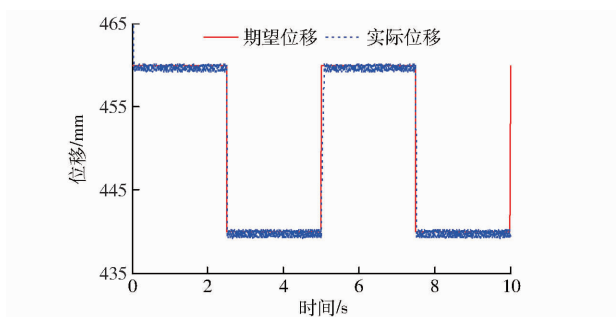


图 18 方波轨迹跟踪

Fig. 18 Square wave trajectory tracking

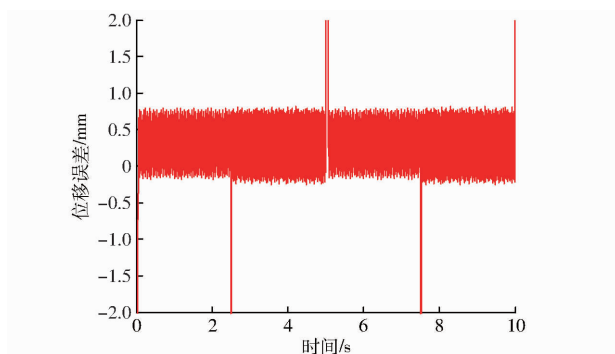


图 19 方波轨迹跟踪误差

Fig. 19 Errors of square wave trajectory tracking

4 结论

(1) 在气动人工肌肉等长实验的基础上,建立了气动人工肌肉静态特性的实验模型,更真实地反映了气动人工肌肉的静态特性,提高了所建气动人工肌肉静态特性模型的精度。

(2) 在理论分析的基础上建立了气动人工肌肉运动控制系统的数学模型,并采用 Simulink 模拟了所建模型对气压和轨迹的跟踪效果。结果表明,所建的控制模型能很好地实现气动人工肌肉的气压与轨迹跟踪控制。

参 考 文 献

- 王斌锐,周唯逸,许宏. 智能气动肌肉的静态驱动特性研究[J]. 农业机械学报, 2009, 40(3):208-212.
WANG B R, ZHOU W Y, XU H. Static actuating characteristics of intelligent pneumatic muscle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(3):208-212. (in Chinese)
- VO-MINH T, TIAHJOWIDODO T, RAMON H, et al. A new approach to modeling hysteresis in a pneumatic artificial muscle using the Maxwell-slip model[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2011, 16(1):177-186.
- OBIJULU S C, ROCHE E T, PIGULA F A, et al. Soft pneumatic artificial muscles with low threshold pressures for a cardiac compression device[C]//ASME 2013 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, 2013, 6A:1-8.
- VO-MINH T, KAMERS B, RAMON H, et al. Modeling and control of a pneumatic artificial muscle manipulator joint—Part I: Modeling of a pneumatic artificial muscle manipulator joint with accounting for creep effect[J]. Mechatronics, 2012, 22(7):923-933.
- DAERDEN F, LEFEBER D. Pneumatic artificial muscles: actuators for robotics and automation[J]. European Journal of Mechanical and Environmental Engineering, 2002, 47(1):11-21.
- CALDWELL D G, Medrano-Cerda G, GOODWIN M. Control of pneumatic muscle actuators[J]. IEEE Control Systems, 1995, 15(1):40-48.
- 杨钢. 气动人工肌肉位置伺服系统研究及其应用[D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.
YANG G. Research on pneumatic muscle actuator position servo system and its application[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2004. (in Chinese)
- BEHROUZ N S, MASOUD B, MOHAMMAD J F. Modelling and controller design of electro-pneumatic actuator based on PWM[J]. International Journal of Robotics and Automation, 2012, 1(3):125-136.
- KIMURA T, HARA S, FUJITA T, et al. Feedback linearization for pneumatic actuator systems with static friction[J]. Control Engineering Practice, 1997, 5(10):1385-1394.
- REPPERGER D W, JOHNSON K R, PHILIPS C A. Nonlinear feedback controller design of a pneumatic muscle actuator system[C]//1999 American Control Conference, IEEE, 1999: 1525-1529.
- AMATO F, COLACINO D, COSENTINO C, et al. Robust and optimal tracking control for manipulator arm driven by pneumatic muscle actuators[C]//2013 IEEE International Conference on Mechatronics (ICM), 2013: 827-834.
- ZHU X C, TAO G L, YAO B, et al. Adaptive robust posture control of a parallel manipulator driven by pneumatic muscles[J]. Automatica, 2008, 44(9):2248-2257.
- SHEN X. Nonlinear model-based control of pneumatic artificial muscle servo systems[J]. Control Engineering Practice, 2010, 18(3):311-317.
- CHOU C P, BLAKE Hannaford. Measurement and modeling of McKibben pneumatic artificial muscles[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1996, 12(1):90-102.
- TONDU B, LOPEZ P. Modeling and control of McKibben artificial muscle robot actuators[J]. IEEE Control Systems, 2000, 20(2):15-38.
- TONDU B, IPPOLITO S, GUIOCHET J, et al. A seven-degrees-of-freedom robot-arm driven by pneumatic artificial muscles for humanoid robots[J]. The International Journal of Robotics Research, 2005, 24(4):257-274.
- PUJANA A A, Mendizabal A, Arenas J, et al. Modelling in modelica and position control of a 1-dof set-up powered by pneumatic muscles[J]. Mechatronics, 2010, 20(5):535-552.

参 考 文 献

- 1 FLORES P. A parametric study on the dynamic response of planar multibody systems with multiple clearance joints[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2010, 61(4): 633 – 653.
- 2 FLORES P, AMBRÓSIO J, CLARO J C P, et al. A study on dynamics of mechanical systems including joints with clearance and lubrication[J]. *Mechanism & Machine Theory*, 2006, 41(3): 247 – 261.
- 3 FLORES P, AMBRÓSIO J, CLARO J C P, et al. Dynamics of multibody systems with spherical clearance joints[J]. *Journal of Computational & Nonlinear Dynamics*, 2006, 1(3): 443 – 451.
- 4 MUKRAS S, KIM N H, MAUNTLE N A, et al. Analysis of planar multibody systems with revolute joint wear[J]. *Wear*, 2010, 268(5 – 6): 643 – 652.
- 5 MUKRAS S, KIM N H, MAUNTLE N A, et al. Comparison between elastic foundation and contact force models in wear analysis of planar multibody system[J]. *Journal of Tribology*, 2010, 132(3): 031604.
- 6 KHEMILI I, ROMDHANE L. Dynamic analysis of a flexible slider-crank mechanism with clearance[J]. *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 2008, 27(27): 882 – 898.
- 7 赵子坤. 含间隙机构动力学仿真与实验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
ZHAO Z K. Dynamic analysis and experiment research of mechanism with clearance [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009. (in Chinese)
- 8 姚昊雄. 考虑多间隙的连杆机构动力学理论研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2014.
YAO H X. A theoretical study on mechanism dynamics with multi-clearances [D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2014. (in Chinese)
- 9 王国庆. 考虑碰撞、非线性阻尼和构件弹性的机构动力学理论与应用研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2002.
WANG G Q. Theory and application research of elastic mechanism dynamics concerning impact and nonlinear damping [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2002. (in Chinese)
- 10 LANKARANI H M, NIKRAVESH P E. A contact force model with Hysteresis damping for impact analysis of multibody systems [J]. *Journal of Mechanical Design*, 1990, 112(3): 369 – 376.
- 11 AMBRÓSIO J A C. Impact of rigid and flexible multibody systems: deformation description and contact models[M] // NATO ASI Series, 2003, 103: 57 – 81.
- 12 NIKRAVESH P E. Computer-aided analysis of mechanical systems[M]. Prentice-Hall, Inc., 1988.
- 13 FLORES P, AMBRÓSIO J, CLARO J P. Dynamic analysis for planar multibody mechanical systems with lubricated joints[J]. *Multibody System Dynamics*, 2004, 12(1): 47 – 74.
- 14 TIMOSHENKO S P, GOODIER J N. Theory of elasticity[M]. New York: McGraw-Hill, 1987.
- 15 HERTZ H. On the contact of rigid elastic solids and on hardness[M]. New York: MacMillan, 1882.
- 16 LU X J, ZHU S H, KE Z M, et al. Dynamic analysis of a multi-link high-speed press[C] // 2011 IEEE International Conference on Measuring Technology & Mechatronics Automation, 2011: 1104 – 1107.
- 17 鹿新建. 高速精密压力机多连杆驱动机构研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2012.
LU X J. Research on multi-link drive mechanism of a high-speed precision press [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012. (in Chinese)
- 18 FLORES P, KOSHY C S, LANKARANI H M, et al. Numerical and experimental investigation on multibody systems with revolute clearance joints[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2011, 65(4): 383 – 398.
- 19 ERKAYA S, İBRAHİM UZMAY. Experimental investigation of joint clearance effects on the dynamics of a slider-crank mechanism[J]. *Multibody System Dynamics*, 2010, 24(1): 81 – 102.
- 20 MUVENGEI O, KIHU J, IKUA B. Dynamic analysis of planar multi-body systems with LuGre friction at differently located revolute clearance joints[J]. *Multibody System Dynamics*, 2012, 28(4): 369 – 393.

(上接第 374 页)

- 18 VO-MINH T, TIAHJOWIDODO T, RAMON H, et al. Cascade position control of a single pneumatic artificial muscle-mass system with hysteresis compensation[J]. *Mechatronics*, 2010, 20(3): 402 – 414.
- 19 沈文臣, 胡宇辉, 余天啸, 等. 气动换挡执行机构压力特性仿真与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(2): 338 – 348.
http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160245&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.02.045.
SHEN W C, HU Y H, YU T X, et al. Simulation and experiment of pressure characteristics for pneumatic shifting actuator[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(2): 338 – 348. (in Chinese)
- 20 王晓龙. 基于高速开关阀的气动高精度运动控制系统关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
WANG X L. Study on key technologies of high precision motion control of a pneumatic system using high speed solenoid valves [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. (in Chinese)
- 21 孟德远, 陶国良, 李艾民, 等. 高速开关阀控气动位置伺服系统的自适应鲁棒控制[J]. *机械工程学报*, 2015, 51(10): 180 – 188.
MENG D Y, TAO G L, LI A M, et al. Adaptive robust control of pneumatic cylinders using fast switching on/off solenoid valves [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(10): 180 – 188. (in Chinese)
- 22 REN B S, PAN J, SHI G L. A new flight simulator driven by pneumatic artificial muscles [C] // Proceedings of the 7th International Conference on Fluid Power Conference, 2009: 507 – 510.