

基于电液作动器技术的机器人关节微型驱动系统*

陈乃建¹ 张进华² 艾长胜¹ 宋方臻¹

(1. 济南大学机械工程学院, 济南 250022; 2. 西安交通大学机械工程学院, 西安 710049)

【摘要】 针对机器人要求驱动器结构紧凑、输出力矩大、响应快速等,提出了一种基于电液作动器技术的机器人关节微型驱动系统。该系统将电动机、泵及负载融为一体,结构简单,布置灵活,能提供较大的系统压力。在磁路分析基础上,建立了电磁式脉冲柱塞泵模型及等效电路,描述了磁场分布及活塞运动对电磁系统的影响。基于机、电、液一体化特征,建立了关节驱动系统工作过程仿真模型,探讨了负载与系统电流的变化关系。仿真及实验结果表明:该系统能够提供最大 2.5 MPa 负载压力,能够在 0~2.4 MPa 压力范围内稳定工作,系统压力响应达到 1.2 MPa/s,能够满足机器人关节的工作需要。

关键词: 机器人 关节 微型驱动系统 电液作动器

中图分类号: TH137.31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)05-0203-07

Micro Driving System for Robot Joint Based on Electro-hydrostatic Actuation Technology

Chen Naijian¹ Zhang Jinhua² Ai Changsheng¹ Song Fangzhen¹

(1. School of Mechanical Engineering, University of Jinan, Jinan 250022, China

2. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract

According to the requirements for the compact structure, large torque, fast response and the other performances of driving system in robot, a joint driving system based on electro-hydrostatic actuation (EHA) technology was proposed. Linear motor, pump and load were integrated to provide larger pressure, simple structure and smart configuration. From the analysis in the magnetic circuit, the electromagnetic piston pump model and its equivalent magnetic circuit were developed to describe the magnetic field and its effect caused by piston's movement in electromagnetic piston pump. Based on character integrated in mechanical, electrical and hydraulic, the working process model of driving system was built to explore relations between load and system current. Simulation and experimental results show that the proposed system can supply the maximum load pressure of 2.5 MPa, work stably at 0~2.4 MPa, and reach 1.2 MPa/s in pressure response. The proposed driving system can meet the requirements in the robot joint driving.

Key words Robot, Joint, Micro driving system, Electro-hydrostatic actuation

引言

机器人关节要求具有较高的灵活性、柔顺性和紧凑的结构,而关节驱动系统的性能决定了机器人

的多种性能指标,如承载能力、外形结构等,因此,驱动系统的选择对于机器人关节设计非常重要。目前,常用的机器人关节驱动器有电动机、气动、液压以及形状记忆合金、压电陶瓷等新材料制成的人工

肌肉^[1-2]等。传统电动机功率/重量比低,通常需要有减速机构来降低速度,增大力矩输出,因此传动系统复杂,布局困难。气动肌肉^[3-6]是气动系统用于机器人关节驱动的一种主要驱动方式,其结构简单、紧凑、安装精度要求不高,但难以实现精确的位置和速度控制。传统的液压在工业机器人关节驱动中具有优势,但其控制系统庞大,同时,与气动肌肉等气动传动一样,由于油(或气)源的布置问题,难以在移动机器人等领域应用。记忆合金、电致伸缩、压电等新材料制成的人工肌肉具有体积小、输出功率大、结构简单等优点^[7-10],但多用于小型或微型机器人系统中。

电液作动器^[11-13](electro-hydrostatic actuation, 简称EHA)是直驱式容积控制电液伺服系统的一种^[14],其具有电动机控制的灵活性与液压输出力矩大的特点,该技术采用功率电传,有效简化了液压回路,当系统压力一定时,通过合理设计承压面结构,可以得到不同的输出力矩,因此,适用于输出力矩大、结构紧凑且易于控制的场合。电液作动器已在飞机舵面调整、汽车传动系统^[15-17]等领域进行了相关应用研究。本文将电液作动器技术应用于机器人关节驱动系统,根据机器人的特点设计关节结构、优化驱动系统的布置,达到关节驱动的结构紧凑、输出力矩大、易于控制的要求。

1 微型电液作动器系统

电液作动器通常由电动机、双向定量泵、控制阀、液压执行元件等组成,该系统由电动机驱动双向定量泵产生液压动力,直接推动液压执行元件工作。该系统无需连续运转的泵站系统提供油源,缩小了系统体积,降低了系统的复杂程度及成本。为满足移动机器人等关节结构紧凑的需求,将直线电动机与液压泵一体化集成,提出一种微型电液作动器系统,实现机器人关节驱动,其原理如图1所示。

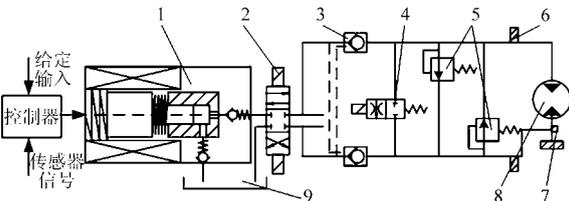


图1 微型关节驱动系统原理图

Fig.1 Diagram of the micro-joint driving system

1. 电磁式脉冲柱塞泵 2. 电磁阀 3. 液压锁 4. 旁通阀 5. 安全阀 6. 压力传感器 7. 位置传感器 8. 关节 9. 油箱

与传统直驱式液压系统不同的是,该系统采用动铁式直线电动机与单向阀集成的电磁式脉冲柱塞泵代替传统的电动机与双向定量泵,可有效简化系

统传动链,提高传动效率,减少系统泄漏,而且系统结构更加紧凑,便于安装与调试。

2 电磁式脉冲柱塞泵结构分析

电磁式脉冲柱塞泵将直线电动机原理与液压系统特征相结合,在电磁场与支撑弹簧作用下动铁受迫运动,在密封腔内对液体进行膨胀与压缩过程,其结构如图2所示。

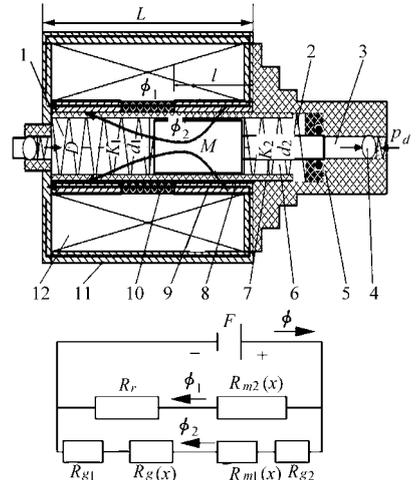


图2 电磁式脉冲柱塞泵的磁路分布及等效磁路

Fig.2 Configuration of pump and its equivalent magnetic circuit

1. 弹簧 2. 右密封腔 3. 单向阀 4. 壳体 5. 左密封腔 6. 推杆 7. 导套 8. 动铁 9. 隔磁环 10. 铁轭 11. 线圈

从图2可知,脉冲柱塞泵由线圈、铁轭、动铁、推杆、导套、弹簧、隔磁环等组成。导套前后两段由导磁材料组成,中间一段由非导磁材料——隔磁环组成。电磁泵的磁路在工作气隙附近被分成两部分: ϕ_1 和 ϕ_2 ,其中 ϕ_1 沿轴向穿过前端部分导套、隔磁环进入后端导套;而 ϕ_2 穿过动铁、径向间隙进入导套后端。当励磁线圈通过半波整流后的正弦波交流电时,气隙中形成变化的气隙磁场,产生电磁力 F_e ,与动铁两端的支撑弹簧相互作用,推动动铁活塞往复运动形成谐振系统,液压油则通过左侧单向阀、导套进入由右密封腔及单向阀组成的压缩腔,被压缩后进入液压执行机构。

磁阻、电感计算公式为

$$\begin{cases} R_i = l_i / (\mu_i S_i) \\ L(x) = N^2 / R(x) \end{cases} \quad (1)$$

式中 R_i ——第*i*个磁阻, H^{-1}

N ——驱动线圈匝数

l_i ——第*i*个磁阻磁路的等效长度, m

S_i ——第*i*个磁阻磁路的截面积, m^2

μ_i ——第*i*个磁阻磁路材料磁导率, H/m

x ——动铁位移, m $L(x)$ ——电感, H

$R(x)$ ——系统的总磁阻, H^{-1}

$$R(x) = \frac{(R_r + R_{m2}(x))(R_g(x) + R_{m1}(x))}{R_r + R_{m2}(x) + R_g(x) + R_{m1}(x)} \quad (2)$$

式中 $R_g(x)$ ——气隙磁阻, H^{-1}

R_r ——隔磁环磁阻, H^{-1}

$R_{m1}(x)$ 、 $R_{m2}(x)$ ——铁芯磁阻, H^{-1}

而电磁式脉冲柱塞泵的电感(不计磁饱和)

$$L(x) = N^2 / R(x) =$$

$$N^2 \left(\frac{1}{R_r + R_{m2}(x)} + \frac{1}{R_g(x) + R_{m1}(x)} \right) \quad (3)$$

电磁力的计算公式为

$$F_e = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(x)}{dx} =$$

$$\frac{1}{2} i^2 N^2 \frac{d}{dx} \left(\frac{1}{R_r + R_{m2}(x)} + \frac{1}{R_g(x) + R_{m1}(x)} \right) \quad (4)$$

式中 i ——线圈电流, A

电磁式脉冲柱塞泵的电感 $L(x)$ 、磁阻 $R(x)$ 、电磁力 F_e 、位移 x 变化情况如图 3 所示。

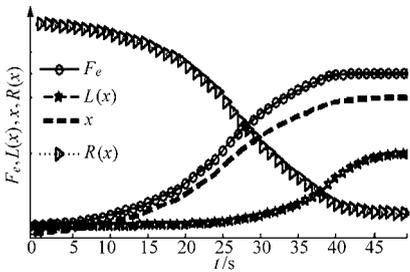
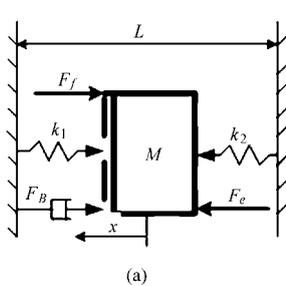
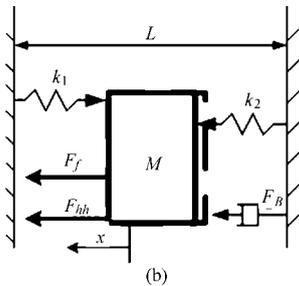


图 3 电感 $L(x)$ 、磁阻 $R(x)$ 、电磁力 F_e 、位移 x 变化曲线

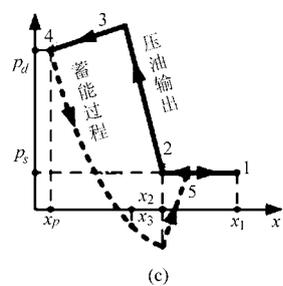
Fig. 3 Curves of inductance $L(x)$, magnetic resistance $R(x)$, electromagnetic force F_e , distance x



(a)



(b)



(c)

图 5 电磁式脉冲柱塞泵的工作过程

Fig. 5 Working process of the pump

(a) 蓄能过程 (b) 压油输出过程 (c) 工作流程

从图 5c 可知,当正弦波交流电源接通后,随着电压升高,线圈电磁力逐渐增大,推杆偏离平衡点 x_p ,密封腔内压力快速下降,推杆左侧弹簧压缩,将电能转化为机械能储存,即蓄能过程。当推杆在电磁力作用下运动到最大位移点 x_1 后,电源断开,线圈电磁力逐渐消失,活塞在弹簧作用下经过 1→2→3→4 各点,向平衡位置移动,使得油液压力从常压 p_s 逐渐升高,当系统压力 p_d 超过单向阀开启压力后,

从图 3 可知,当在脉冲柱塞泵两端加入电压 u 后,随着动铁位移的增大,电磁力 F_e 、电感 $L(x)$ 逐渐增大,磁阻 $R(x)$ 逐渐变小,而随着电磁力 F_e 的增大,又促进动铁位移的增大,当动铁移动到一定位置时,电磁力与支撑弹簧弹性力等平衡,从而使得动铁到达最大位移点。电感的增加与磁阻的减小是由隔磁环与气隙造成的,当动铁端面越过隔磁环端面后,电感与磁阻值将不再变化。

3 微型关节驱动系统仿真模型

3.1 电磁式脉冲柱塞泵数学模型

电磁式脉冲柱塞泵等效电路如图 4 所示。

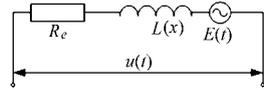


图 4 电磁式脉冲柱塞泵等效电路

Fig. 4 Equivalent circuit of the pump

则电磁式脉冲柱塞泵的电学方程为

$$u = iR_e + L(x) \frac{di}{dt} + E(t) \quad (5)$$

其中

$$E(t) = vi \frac{dL(x)}{dx}$$

式中 $E(t)$ ——感应电动势, V

R_e ——柱塞泵系统等效电阻, Ω

v ——动铁的运动速度, m/s

3.2 电磁式脉冲柱塞泵工作过程分析

电磁式脉冲柱塞泵在一个工作周期内包括蓄能和压油输出两个过程,该过程如图 5 所示。

实现压油输出过程。上述电源接通与断开,使得活塞在导套内往复运动,实现蓄能与压油输出循环进行。图中的 x_2 、 x_3 分别为推杆退出密封腔及右侧弹簧自由时的动铁活塞位移。

对于蓄能过程,动铁活塞的力平衡方程为

$$F_e - F_f = \begin{cases} M \ddot{x} + F_B + (k_1 + k_2)x(t) & (x \leq x_3) \\ M \ddot{x} + F_B + k_1(x_0 + x(t)) & (x > x_3) \end{cases} \quad (6)$$

其中 $F_B = c \dot{x}$
 式中 x_0 ——动铁平衡时左侧弹簧压缩量, mm
 k_1, k_2 ——两侧弹簧刚度, N/mm
 F_f ——摩擦力, N
 F_B ——阻尼力, N
 M ——等效质量, kg
 c ——阻尼系数, N·s/m

对于压油输出过程, 动铁活塞的平衡方程为

$$M \ddot{x} + F_B + F_{hh} + F_f = \begin{cases} k_1(x_0 + x(t)) & (x_2 \geq x > x_3) \\ (k_1 + k_2)x(t) & (x(t) < x_3) \end{cases} \quad (7)$$

其中 $F_{hh} = p_d(t)A$
 式中 F_{hh} ——液体压力对推杆的阻尼力, N
 $p_d(t)$ ——关节系统负载压力, MPa
 A ——推杆截面积, m²

当压油输出结束时, 负载阻力与弹簧力平衡。

$$F_{hh} = (k_1 + k_2)x_p = p_d(t)A \quad (8)$$

式中 x_p ——压油输出过程中动铁的平衡位置, m
 这里, 忽略动铁运动过程中所受的摩擦力。

3.3 机械手关节负载特性

3.3.1 机械手关节的转矩输出

微型关节驱动系统的工作特性是与负载相联系的, 液体的压力是由于有了负载才建立起来的, 负载的大小决定了压力的高低, 对于机械手关节来说, 其输出力为

$$\begin{cases} F = p_d(t)A_1 - p_2A_2 \\ \tau = FL_d \end{cases} \quad (9)$$

式中 A_1, A_2 ——液压缸左、右腔有效工作面积, m²
 p_2 ——回油腔压力, MPa
 τ ——机械手关节的输出力矩, N·m
 L_d ——力臂长度, m

3.3.2 机械手关节的运动速度

当承压面确定时, 机械手关节的角速度 ω_m 与液压泵的流量 Q 之间的关系为

$$\omega_m = 2Q\eta / [b(R_1^2 - R_2^2)]$$

式中 R_1, R_2 ——关节摆动缸直径, m
 b ——摆动缸的叶片宽度, m
 η ——关节摆动缸的传动效率

而液压泵的流量为

$$Q = \sum_{i=0}^n q(t) \quad (10)$$

其中 $q(t) = V_p - \frac{p_d(t)A^2}{k_1 + k_2} - q_x$

式中 n ——活塞往复运动频率, Hz
 $q(t)$ ——液压泵在 t 时刻的排量, m³/次

V_p ——右侧密封腔的容积, m³

q_x ——柱塞泵的泄漏量, m³

3.3.3 系统的固有频率

假设机器人微型关节驱动系统的液压力是线性的, 则固有频率为

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{(k_s + k_h)(1 - \xi^2)}{M}} \quad (11)$$

其中 $k_h = 4Ap_d(t)/x$
 $\xi = C / (2\sqrt{k_sM + k_hM})$

式中 k_s ——等效弹簧刚度
 k_h ——系统油液的等效刚度
 ξ ——归一化的相对阻尼系数

4 仿真与实验

为验证电磁式脉冲柱塞泵的工作原理及驱动能力, 分别对机器人关节驱动系统进行了仿真及实验。系统主要参数为: $k_1 = 3.35$ N/mm, $k_2 = 2.5$ N/mm, $x_0 = 4.69$ mm, $x_2 = 8$ mm, $x_3 = 6.3$ mm, $c = 4$ N·s/m, $M = 30$ g, $k_s = 3350$ N/mm, $N = 1500$, $A = 28$ mm², $V_0 = 3846$ mm³, 电源 U 为 220 V, 50 Hz。

4.1 仿真

根据机器人微型关节驱动系统仿真模型, 利用 Simulink 软件对关节驱动系统在有、无负载两种情况下进行仿真, 其结果如图 6 所示。

由图 6 可知, 微型关节驱动系统电流随着压力的提高不断增大, 从无负载时的 0.2 A 增大到负载压力 2 MPa 时的峰值 0.6 A, 电磁力也由无负载的稳态峰值 26 N 增加到负载压力 2 MPa 时的稳态峰值 40 N, 同时, 由于系统采用半波整流的正弦交流电压工作方式, 每次循环开始, 由于 du/dt 、 di/dt 的影响, 电磁力存在瞬时尖峰。从动铁的运动特征看, 在无负载时, 动铁位移、加速度波形变化比较规则, 而在负载 2 MPa 时, 动铁平衡位置有所偏移并且在平衡点附近的运动不规则。上述现象表明, 外部负载的变化引起动铁平衡点变化, 而动铁运动使线圈产生感生电动势, 动铁速度的变化引起感生电动势变化, 从而引起系统电流等变化。

考虑到活塞位移 x 以及油液体积模量对驱动系统特性的影响, 随着负载压力的增大及活塞的不断运动, 系统的固有频率将逐渐增大, 从而引起系统电流、压力与流量的变化, 仿真结果如图 7 所示。

由图 7a 可知, 系统固有频率随负载压力增大而增大; 而在同样的负载压力时, 系统固有频率随活塞位移减小而增大, 系统固有频率在活塞平衡

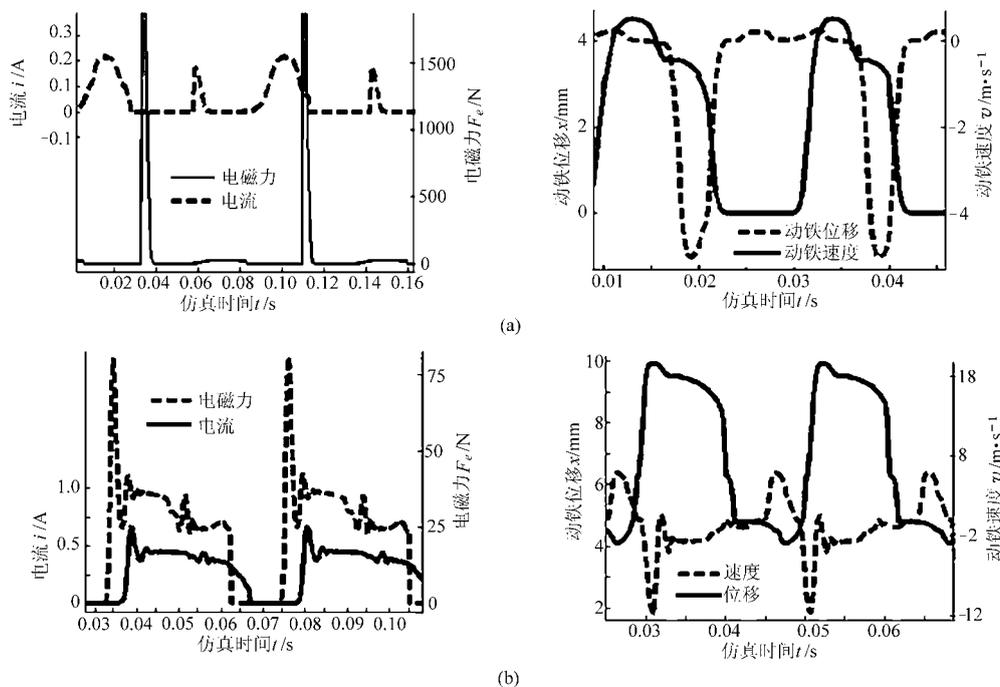


图 6 关节驱动系统仿真曲线

Fig. 6 Simulation results of the joint driving system

(a) 无负载 (b) 系统压力为 2 MPa

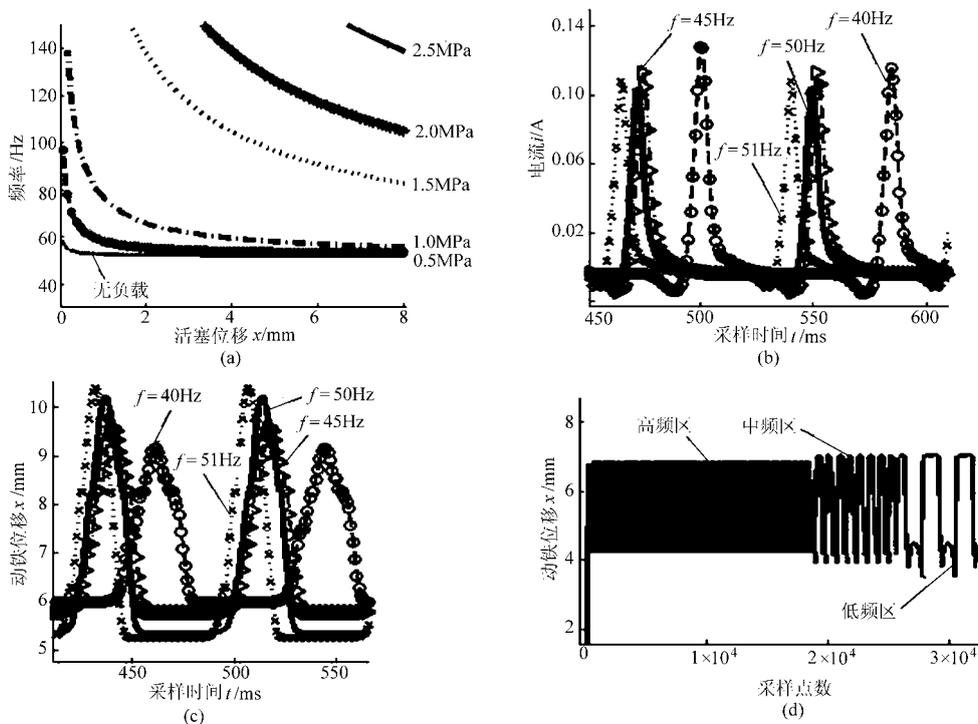


图 7 微型关节驱动系统的频率特性

Fig. 7 Frequency characteristic of the joint driving system

位置附近时显著增加。常压时,系统的固有频率约为 50 Hz,活塞行程约为 8 mm,具有较大的系统流量。随系统压力升高,活塞行程减小,从而引起系统流量的下降。从图 7b 可知,当驱动系统在不同的脉冲频率下工作时,系统需要不同的工作电流,在驱动系统的固有频率 50 Hz 附近时,系统需要提供的电流最小,而当工作频率大于或小于系

统的固有频率时,电流都会增大。由图 7c 可知,动铁在不同的工作频率时,会有不同的位移,与系统电流随工作频率变化情况类似,活塞在系统的固有频率附近时,位移最大,即当工作频率为 50 Hz 左右时,输出油液流量较大。而在其他频率时,动铁位移明显减小。图 7d 为驱动系统在不同频率时柱塞位移变化情况。

4.2 实验

根据微型关节驱动系统原理图搭建的移动机械手实验平台如图8所示。物理实验由工控机、812PG数据采集卡、固态继电器及二极管等构成,通过对交流电源的整流与通断,实现对微型关节驱动系统的控制,并在恒定负载、扰动负载情况下对电流、系统压力及系统流量等参数进行测试,实验结果如图9所示。

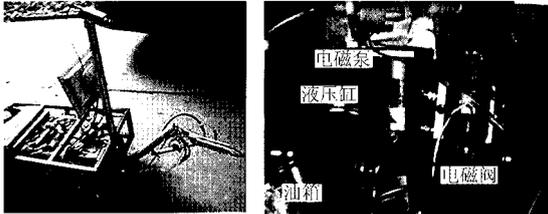


图8 移动机械手关节驱动实验系统

Fig.8 Experimental system of the joint driving system

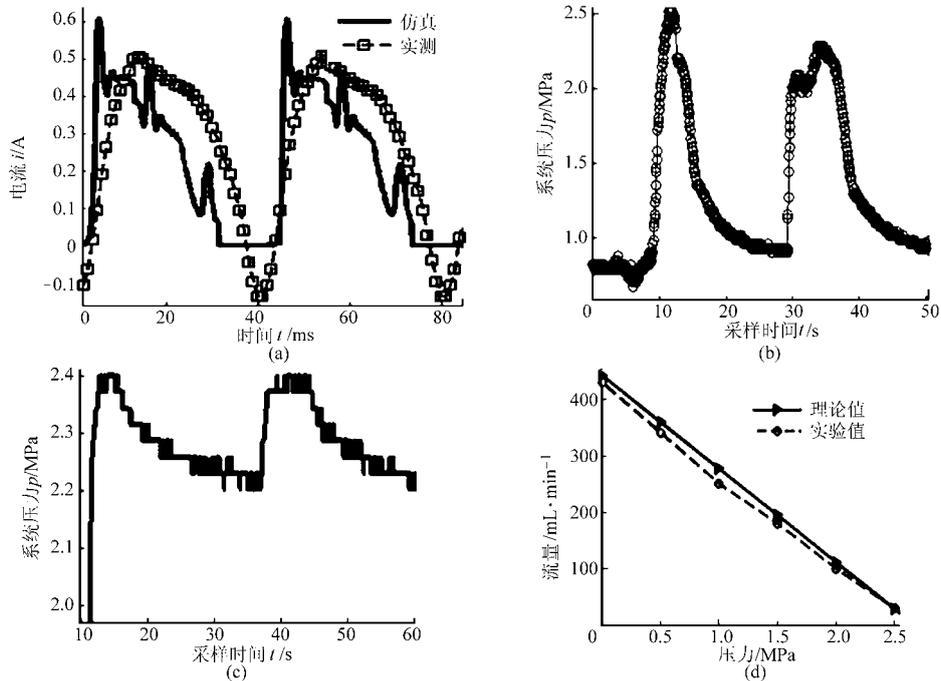


图9 关节驱动系统实验特性曲线

Fig.9 Performances of the joint driving system

随系统压力增加,流量不断变小,呈近似直线变化。

5 结论

(1)提出了基于EHA技术的微型机器人关节驱动系统,该系统将电动机、泵及负载压力合理集成,结构简单,布置灵活,能提供较大的系统压力。

(2)在磁路分析基础上,对电磁式脉冲柱塞泵的物理模型及其等效电路进行电磁场分析和模拟仿

真,证明了电磁泵物理模型的合理性。
(3)建立了关节驱动系统工作过程的数学模型,利用仿真与物理实验相结合的方法验证了该模型的可行性。
(4)实验结果表明,该驱动系统能够输出大于2.5 MPa的液压力,能够稳定工作在0~2.4 MPa,系统压力响应时间约为1.2 MPa/s,能够满足移动机械手等关节驱动的需要。

参考文献

- 1 苏生荣, 应申舜. 面向机器人驱动的人工肌肉技术研究进展[J]. 机械科学与技术, 2009, 28(6): 834~840.
Su Shengrong, Ying Shenshun. A review of robot driving technology using artificial muscles[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2009, 28(6): 834~840. (in Chinese)

- 2 张江涛, 关胜晓, 汪增福. 一种新型人工肌肉驱动机理与仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(9): 2390 ~ 2394.
Zhang Jiangtao, Guan Shengxiao, Wang Zengfu. Principle and simulation of new artificial muscle[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(9): 2390 ~ 2394. (in Chinese)
- 3 卫玉芬, 李小宁. 气动肌肉驱动的柔顺机器人操作手的设计和实现[J]. 机器人, 2005, 27(5): 445 ~ 449.
Wei Yufen, Li Xiaoning. Design and implementation of a flexible manipulator actuated by pneumatic muscle[J]. Robot, 2005, 27(5): 445 ~ 449. (in Chinese)
- 4 鲍官军, 邵铁锋, 李尚会, 等. 气动柔性摆动关节静态模型[J]. 农业机械学报, 2011, 42(6): 198 ~ 202.
Bao Guanjun, Shao Tiefeng, Li Shanghui, et al. Static model of flexible pneumatic swaying joint[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(6): 198 ~ 202. (in Chinese)
- 5 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 Binrui, Zhou Weiyi, Xu Hong. Static actuating characteristics of intelligent pneumatic muscle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(3): 208 ~ 212. (in Chinese)
- 6 何国昆, 刘吉轩, 张振营. 气动人工肌肉的动态驱动特性研究[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(5): 588 ~ 591.
He Guokun, Liu Jixuan, Zhang Zhenying. Dynamic actuating characteristic of pneumatic muscle actuator[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(5): 588 ~ 591. (in Chinese)
- 7 李明东, 奚汉达, 储金获, 等. 一种形状记忆合金丝驱动的微小型六足机器人[J]. 上海交通大学学报, 2000, 34(10): 1428 ~ 1429.
Li Mingdong, Xi Handa, Chu Jinhua, et al. A micro/miniature six legged robot driven by SMA wires[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2000, 34(10): 1428 ~ 1429. (in Chinese)
- 8 杨凯, 辜承林. ESMMA 驱动的多指机械手研究[J]. 机械工程学报, 2005, 41(6): 203 ~ 207.
Yang Kai, Gu Chenglin. Research on esmaa-actuated multi-fingered robot hand[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(6): 203 ~ 207. (in Chinese)
- 9 曾平, 温建明, 程光明, 等. 新型惯性式压电驱动机构的研究[J]. 光学精密工程, 2006, 14(4): 623 ~ 627.
Zeng Ping, Wen Jianming, Cheng Guangming, et al. Research on novel inertial piezoelectric actuator [J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14(4): 623 ~ 627. (in Chinese)
- 10 李淑英, 王博文, 周严, 等. 叠层复合磁致伸缩材料驱动器的输出位移特性[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(1): 71 ~ 75.
Li Shuying, Wang Bowen, Zhou Yan, et al. Output displacement of actuator based on Terfenol-D multilayered composite [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(1): 71 ~ 75. (in Chinese)
- 11 Habibi S, Goldenberg A. Design of a new high performance electro hydraulic actuator[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2000, 5(2): 158 ~ 164.
- 12 Saeid Habibi, Richard Burton, Eric Sampson. High precision hydrostatic actuation system for micro-and nanomanipulation of heavy loads[J]. ASME Journal of Dynamic System, Measurement, and Control, 2006, 128(4): 778 ~ 787.
- 13 马纪明, 付永领, 李军, 等. 一体化电动静液作动器(EHA)的设计与仿真分析[J]. 航空学报, 2005, 26(1): 79 ~ 83.
Ma Jiming, Fu Yongling, Li Jun, et al. Design, simulation and analysis of integrated electrical hydrostatic actuator[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2005, 26(1): 79 ~ 83. (in Chinese)
- 14 魏树国, 赵升吨, 张立军, 等. 直驱泵控式液压机液压系统的动态特性仿真及优化[J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(7): 79 ~ 82.
Wei Shuguo, Zhao Shengdun, Zhang Lijun, et al. Dynamic simulation and optimization of hydraulic system for new directly-driven pump controlling hydraulic press[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(7): 79 ~ 82. (in Chinese)
- 15 刘涛, 刘清河, 姜继海. 静液传动系统自适应模糊滑模控制[J]. 农业机械学报, 2010, 41(1): 29 ~ 33.
Liu Tao, Liu Qinghe, Jiang Jihai. Adaptive fuzzy sliding mode control for hydrostatic transmission system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(1): 29 ~ 33. (in Chinese)
- 16 杨磊, 马彪, 李和言. 高速履带车辆静液驱动转向控制策略[J]. 农业机械学报, 2010, 41(6): 14 ~ 19.
Yang Lei, Ma Biao, Li Heyan. Steering control strategy of high-speed hydrostatic drive tracked vehicle [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(6): 14 ~ 19. (in Chinese)
- 17 韩文, 常思勤. 二次调节静液车辆传动系统的智能 PID 控制[J]. 农业机械学报, 2004, 35(5): 9 ~ 11.
Han Wen, Chang Siqin. Research on intelligent PID control of vehicle hydrostatic transmission with secondary regulation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(5): 9 ~ 11. (in Chinese)