

液压驱动机械臂的设计与关节驱动分析^①

高进芃^{②*} 熊禾根^{*} 陶 永^{③**} 刘 辉^{**} 谢 光^{*}

(^{*} 武汉科技大学机械自动化学院 武汉 430081)

(^{**} 北京航空航天大学机械工程及自动化学院 北京 100191)

摘 要 设计了一种新型六自由度串联机械臂,并提出了基于液压摆动缸的机械臂驱动关节控制方法。机械臂驱动关节由两个输出轴相互垂直的液压摆动缸提供动能,驱动形式采用闭环液压驱动,闭环控制系统由上位机、信号控制卡、电位传感器等组成。建立了该机械臂的三维模型,应用 D-H 方法对其进行了运动学建模和正向运动学分析,最后对基于液压摆动缸的机械臂驱动关节控制方法进行了实验分析,得出了机械臂关节运行速度与脉宽调制(PWM)调速占空比的关系,根据实验结果得出了相应的运动曲线关系,为串联机械臂位置控制、运动路径控制研究提供了基础。

关键词 串联机械臂, 液压摆动缸, 关节驱动控制, D-H 运动学方程, 脉宽调制(PWM)占空比, 调速

0 引 言

机械臂是目前机器人领域中得到最广泛应用的机械装置,用于替代汽车制造、电子电气等行业中的人工操作,极大地降低人力成本,和提高生产效率,并有效地提高产品生产质量。传统的机械臂设计多考虑单一形式的应用,一般只为完成特定的任务,具体关节和自由度的变化能力较差,且多采用电动机加减速机的方式,承载能力相对较小,因而迫切需要研制一种新型驱动方式的具有较大承载能力的机械臂。针对这种需求,本研究进行了液压驱动机械臂的设计,因为液压传动具有出力大、重量轻、惯性小以及输出刚度大的突出优点,同时,液压系统可以通过提高系统的压力来提高输出功率,其功率-质量比及力-质量比均具有巨大优势,尤其是具有较大承载能力的机械臂。

1 相关研究

目前对由模块化关节组成的六自由度液压机械臂的研究相对较少。国外在液压系统运用的研究方面,波士顿动力工程研究的 BigDog,主要是用于崎岖山路的搬运工作,是一个比较纯种的军事或工程机器人,BigDog 运动能力出众,其选择液压执行器作为关节驱动元件,把液压执行器与四足机构结合在一起,并根据液压传动的两个特性:液压系统的油压大小取决于外界负载,执行元件的速度取决于液压系统的流量。其研制的 ATLAS 双腿大型机器人,其内部也装有 28 个液压驱动关节,因为在相同体积下,现在最高水平的电机与液压系统之间仍然有 20 ~ 30 倍的功率差距,液压系统的单位能量输出密度比电机更大,可以使机器人的体积更小^[1-5]。在国内研究方面,山东大学的李贻斌等人设计了能够适应复杂地形环境的高动态、高负载能力的液压驱动四足机器人,并构造了基于液压驱动的四足机器

① 科技部支撑计划(2015BAF01B03)资助项目。
② 男,1990 年生,硕士生;研究方向:机械系统设计与控制;E-mail: gaopengv5@163.com
③ 通讯作者,E-mail: taoy@buaa.edu.cn
(收稿日期:2017-01-09)

人腿关节结构,并对其步态规划进行了研究学习。浙江大学于昂可等人主要对液压驱动双足机器人进行了研究,对液压驱动双足机器人总体方案进行设计等^[6-9]。闫继宏等研制了一种新型机械臂模块化旋转关节,并基于构型平面匹配的方法实现了对机械臂的模块化运动学求解^[10]。姜宏超等人针对自主研发的六自由度模块化机械臂的逆运动学进行了分析,用于机械臂末端的定位和运动规划^[11]。王帅军在其模块化机械臂设计及其路径规划方法研究中进行了关节结构的设计和机械臂连杆的结构设计与优化,并研究了空间机械臂的运动学^[12]。丁渊明等提出了一种基于工作空间和能量消耗综合指标的机械臂结构优化方法,以解决相应的机械臂结构优化问题^[13]。李研彪提出了一种新型的 3-DOF 串并混联拟人机械臂,并对其运动学性能进行了分析^[14]。李世其等人设计了一种两自由度机械臂运动模块,并根据模块研制了一台六自由度空间机械臂^[15,16]。

通过对以上相关文献研究可知,对液压机械臂结构设计与运动学分析方面研究不多,并逐渐成为近期研究的热点。波士顿动力工程研究的 BigDog、ATLAS 等基于液压驱动的具有高动态响应,与环境适应性的机器人充分发挥液压驱动系统所具有的优点,以及国内山东大学等机构的研究,进一步推动了国内外在液压方面的研究。本文提出了一种新型结构形式的六自由度串联液压机械臂,其驱动关节由两个输出轴相互垂直的液压摆动缸构成,可实现关节的模块化连接;并提出了其驱动形式为一种闭环形式的液压驱动,并且提出了机械臂的驱动关节控制方法,其控制系统由上位机、信号控制卡、电位传感器等组成,进而给出了机械臂的三维模型,应用 D-H 方法进行了运动学建模和正向运动学分析。最后,对于基于液压摆动缸的机械臂驱动关节控制方法进行了实验分析,得出了机械臂关节运行速度与 PWM 调速占空比的比例函数关系。

2 机械臂本体结构设计

六自由度串联机械臂由三组驱动关节模块组成,每一个驱动关节模块由机械部分、控制部分、信

号传感部分组成,如图 1 所示。图 1 为机械臂驱动关节机械部分,图 2 为其控制模型。其控制系统由上位机、信号控制卡、电位传感器等组成,当机械臂驱动关节开始工作时,通过编写好的上位机程序,向驱动电机发送指令,从而带动齿轮泵转动,齿轮泵流量为 Q , 输出压力油驱动位于机械臂驱动关节内部的液压摆动缸,当其运动时,根据安装于摆动缸输出末端端电位传感器测量的数据,即转动角度 θ_i , 反馈于上位机程序中,在上位机程序中根据目标位姿与运动位置所达到的位姿做对比后,由上位机程序控制的电机转速进而使得齿轮泵输出的压力油流量 Q 变化,形成整个机械臂的闭环控制。其中驱动关节由两个轴向输出相垂直的液压摆动缸提供关节的转动 α_i 和摆动 β_i , 在两个液压摆动缸的输出端连接有电位传感器。其整机三维模型如图 3 所示。

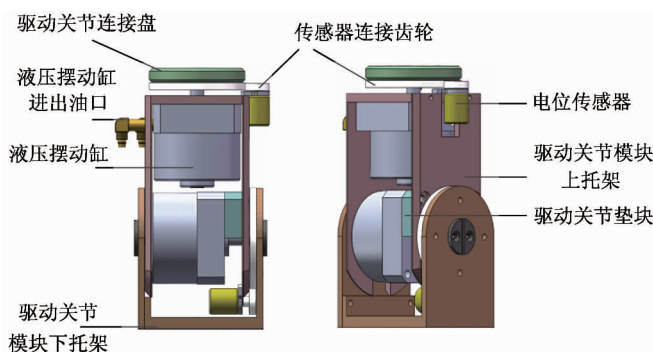


图1 机械臂驱动关节机械结构

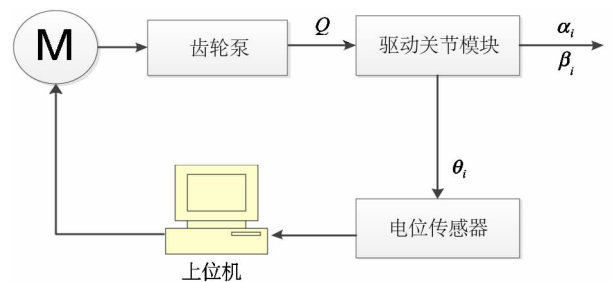


图2 机械臂驱动关节控制模型

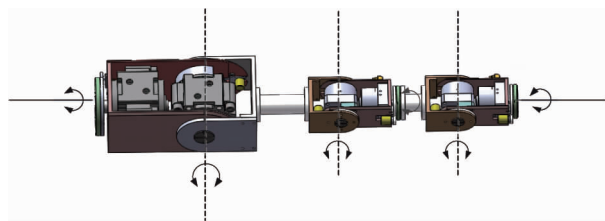


图 3 整机装配图

3 机械臂运动学建模

根据机械臂的组成,其为串联六自由度机械臂,在对机械臂全部连杆规定坐标系后,用 D-H 法对机械臂建立 D-H 运动学方程建模。其中{0}坐标系选在底座的底面,{6}坐标系选在终端顶面,其结构简图如图 4 所示,用于运动学分析的整体构型图如图 5所示。

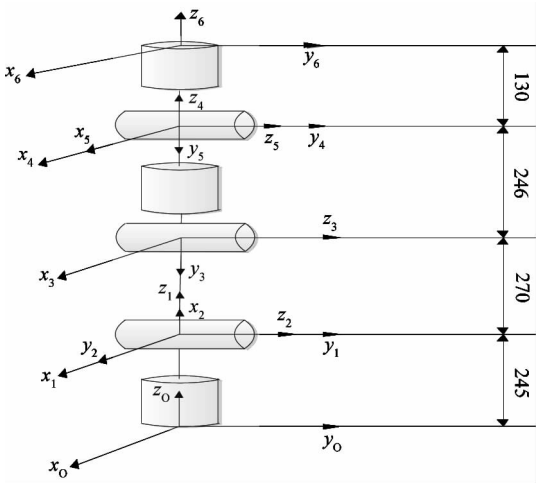


图 4 串联六自由度机械臂结构简图

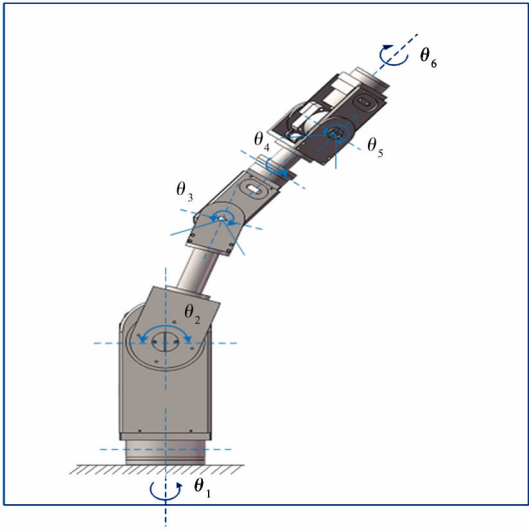


图 5 运动学分析整体构型图

其中根据模型数据可得机械臂 D-H 坐标系参数如表 1 所示。

表 1 机械臂 D-H 坐标系结构参数表

i	$\alpha_{(i-1)}$ ($^{\circ}$)	$a_{(i-1)}$ (mm)	d_i (mm)	θ_i ($^{\circ}$)	变量范围($^{\circ}$)
1	0	0	245	θ_1	-135, +135
2	-90	0	0	θ_2	-135, +135
3	0	270	0	θ_3	-135, +135
4	+90	0	246	θ_4	-135, +135
5	-90	0	0	θ_5	-135, +135
6	+90	0	130	θ_6	-135, +135

机器人末端坐标系相对于机器人固定坐标系的齐次坐标变换可表示为

$${}^i_{i-1}T = Rot(X, \alpha_{i-1}) Trans(X, a_{i-1}) Rot(Z, \theta_i) Trans(Z, d_i) \tag{1}$$

$${}^i_{i-1}T = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & a_{(i-1)} \\ \sin\theta_i \cos\alpha_{(i-1)} & \cos\theta_i \cos\alpha_{(i-1)} & -\sin\alpha_{(i-1)} & -\sin\alpha_{(i-1)} d_i \\ \sin\theta_i \sin\alpha_{(i-1)} & \cos\theta_i \sin\alpha_{(i-1)} & \cos\alpha_{(i-1)} & \cos\alpha_{(i-1)} d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
$${}^6_0T = {}^1_0T {}^2_1T {}^3_2T {}^4_3T {}^5_4T {}^6_5T \tag{2}$$

带入机械臂初始角度可得

$${}^6_0T = {}^1_0T {}^2_1T {}^3_2T {}^4_3T {}^5_4T {}^6_5T$$
$$= \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 891 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3}$$

计算结果与图中理论坐标系结果完全一致,结构方面符合设计与理论要求。

4 机械臂单关节转动角度与占空比的比例函数

单关节的动力源采用液压摆动缸。单关节自由度液压驱动系统包括:齿轮泵、减压阀、三维四通电磁换向阀。齿轮泵采用直流电机驱动,采用 PWM 方法对电机进行调速控制,控制齿轮泵的转动,改变流量输出,从而控制单关节的位置运动和速度控制。根据齿轮泵模型

$$Q = k_q \cdot \omega = k_p \cdot k_q \cdot \omega_{\max} \cdot D_{\text{pwm}} \tag{4}$$

可知齿轮泵的流量与最大转速 1450rpm、PWM 参数、每转的输出流量以及齿轮泵的容积效率。其中，容积效率是一条和转速相关的曲线，为了简化计算，我们讲这条曲线等同一条二次曲线。根据齿轮泵产品的参数，转速为 0 时，容积效率为 0，转速为 200 时，容积效率为0.7，转速为 1450 时，容积效率为 1，根据这 3 个参数，可以计算容积效率的二次曲线为

$$k_p = a \cdot \omega_{\max} \cdot \omega_{\max} \cdot D_{pwm} \cdot D_{pwm} + b \cdot \omega_{\max} \cdot D_{pwm} + c$$

$$a = (1/1450 - 0.7/200)/1250$$

$$\text{其中: } b = 0.7/200 - 200 \cdot a$$

$$c = 0$$

齿轮泵模型可以修改为

$$Q = (aD_{pwm}D_{pwm} \cdot \omega_{\max} \omega_{\max} + b \cdot D_{pwm} \omega_{\max} + c) k_p \omega_{\max} D_{pwm}$$

式中: Q 为齿轮泵流量, k_q 为每转流量, $\omega_{\max}$ 为额定最大转速, D_{pwm} 为电机运行占空比。

5 实验与验证

根据机械臂齿轮泵流量的模型参数,对单关节速度控制进行实验分析,在对单关节速度控制实验分析过程中,所搭建实验平台如图 6 所示。

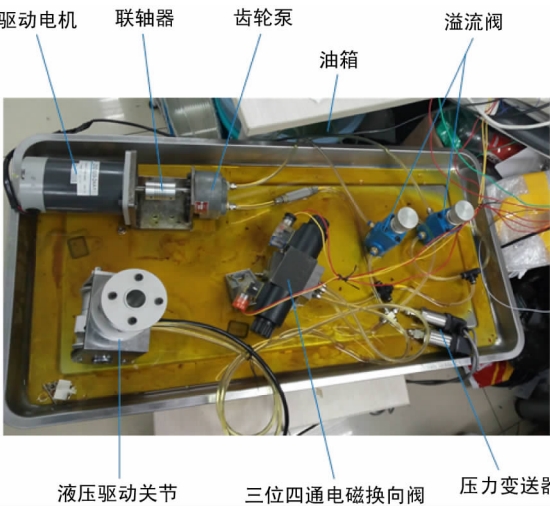


图 6 实验平台

机械臂驱动关节的控制操作界面如图 7 所示。为基于 MFC 所编写控制界面,其基于上位机的控制

界面如图 7 所示:其主要包括系统配置部分、关节运动控制部分(图 8)、绘图区域等功能模块,在驱动关节控制部分,主要有目标位置设定,初始占空比输入等操作部分。



图 7 机械臂驱动关节上位机操作界面



图 8 关节运动控制部分

在操作界面进行各组数据的输入后进行 4 组实验分析,并得出 ABCD 等 4 组实验数据如表 2 所示。

表 2 实验数据表

	A 组	B 组	C 组	D 组
实测位置	188°	187°	186°	185°
目标位置	100°	100°	100°	100°
PWM 占空比	40%	50%	60%	70%
所用时间 T1	17s	9.6s	9.3s	8.3s
测量时间 T2	28.57s	14s	12s	10.36s

机械臂驱动关节模块转动/摆动后由电位传感器所测的从初始记录位置运动至相同末端位置时所采数据值如下所示,分为 ABCD 4 组数据,纵坐标表示角度变化,横坐标表示其在运动过程中所采数据个数(图 9)。

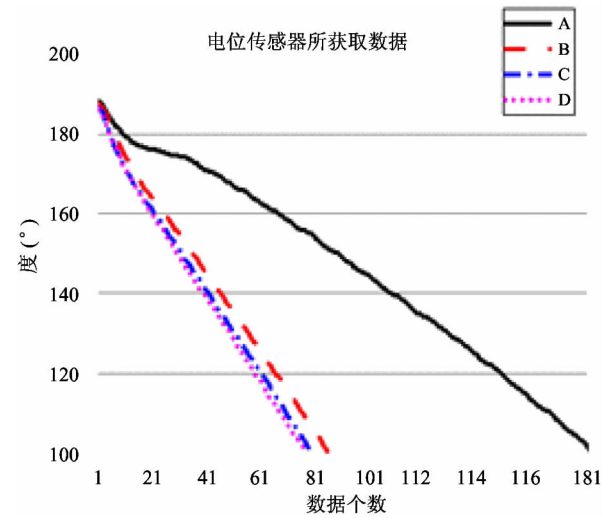


图 9 电位传感器所测数据

对根据实验测得的不同占空比下关节的运行位置变化曲线进行分析计算可得,在所选的 4 个占空比下,其具体运行时间依次为 17s,9.6s,9.3s,8.3s。其在不同占空比下所得的关节运动速度图如图 10 ~ 图 13 所示,并根据速度变化,得出在所分析占空比范围内,关节运行速度与其关系如图 14 所示:

通过在几组电机运行不同占空比下的数据可得出,当 PWM 调速占空比增大时,即电机转速加快时,其带动液压齿轮泵相应输出液压油流量增多,从而使得由其驱动的液压摆动缸驱动关节运行速度发生变化,根据位置传感器测得的数据与记录时间,可得其呈一定的线性关系,与模型

$$Q = (aD_{\text{pwm}}D_{\text{pwm}} \cdot \omega_{\text{max}}\omega_{\text{max}} + b \cdot D_{\text{pwm}} \cdot \omega_{\text{max}} + c) \cdot k_q\omega_{\text{max}}D_{\text{pwm}}$$

相呼应。

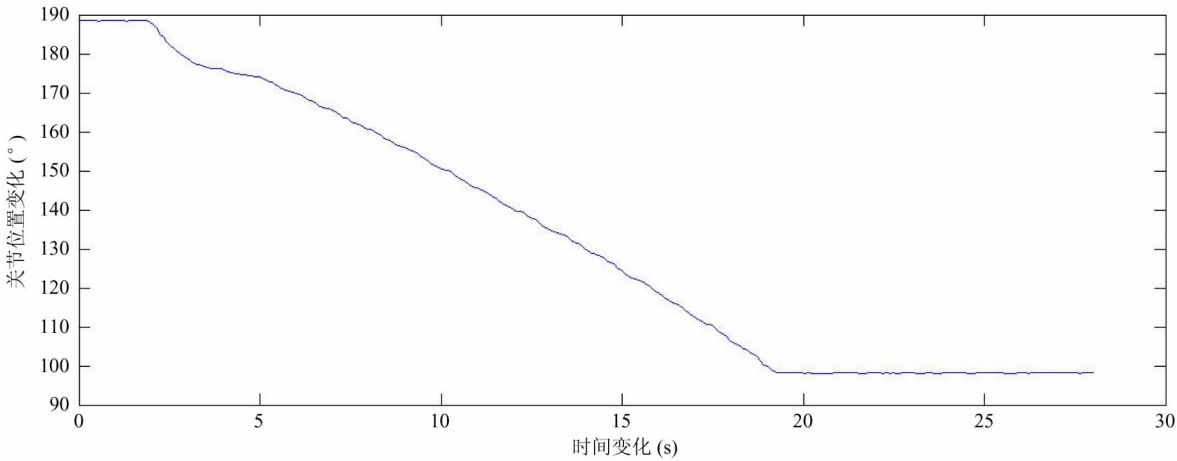


图 10 电机运行 PWM 调速占空比为 40% 时位置变化曲线

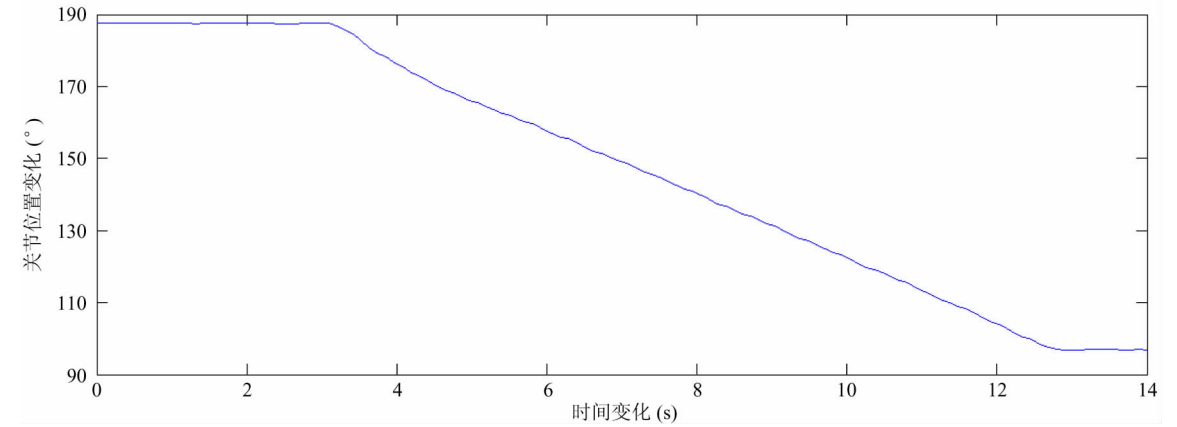


图 11 电机运行 PWM 调速占空比为 50% 时位置变化曲线

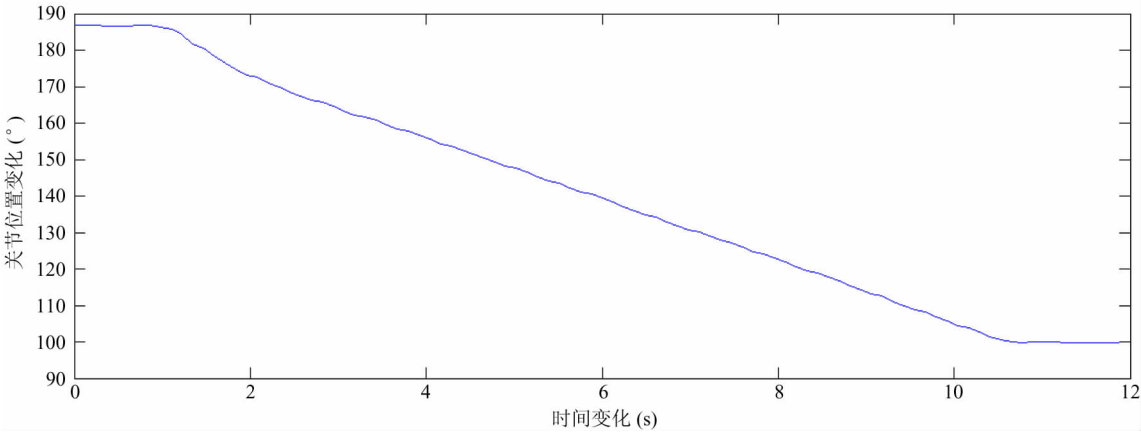


图 12 电机运行 PWM 调速占空比为 60 % 时位置变化曲线

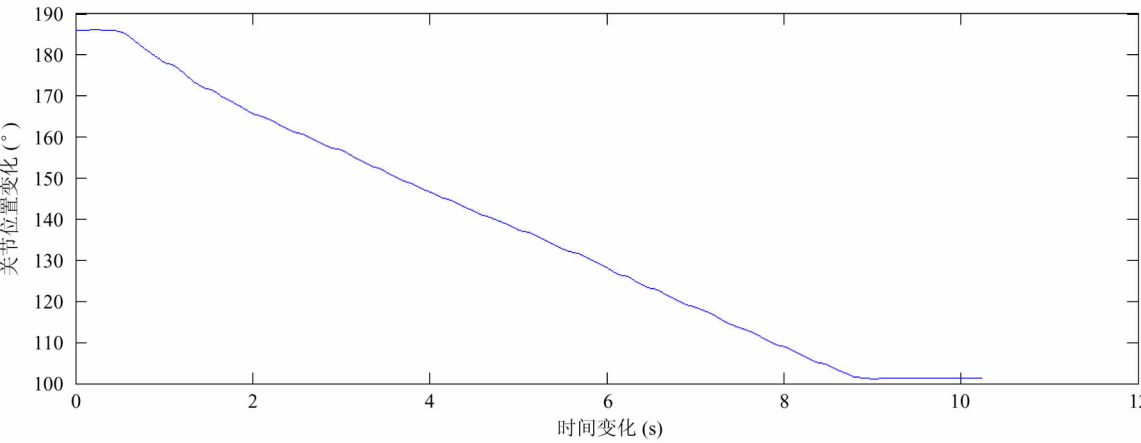


图 13 电机运行 PWM 调速占空比为 70 % 时变化曲线

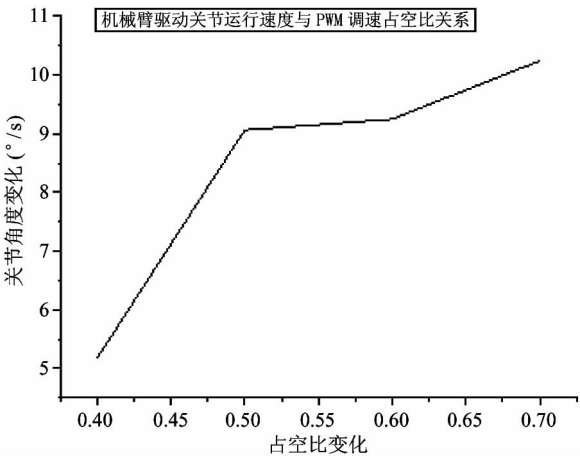


图 14 关节角速度变化曲线

6 结 论

本文提出了一种基于液压摆动缸的 6 自由度串联机械臂控制方法,对机械臂的结构部分进行介绍,

采用 D-H 法得出了其整体机械臂的正运动学方程,针对机械臂单关节的精确运动速度控制,提出了其运动速度与其系统中驱动电机 PWM 调速占空比的比例函数关系,并对于基于液压摆动缸的机械臂驱动关节控制方法进行实验分析,通过实测实验数据得出机械臂驱动关节运行速度与 PWM 调速占空比存在比例函数的关系,为后续串联机械臂的位置控制,运动路径控制提供了研究基础。

参考文献

[1] 丁良宏. Big Dog 四足机器人关键技术分析. 机械工程学报, 2015, 51(7): 1-23

[2] 吴伟国. 面向作业与人工智能的仿人机器人研究进展. 哈尔滨工业大学学报, 2015, 47(7): 1-19

[3] Nelson G, Saunders A, Neville N, et al. Petman: a humanoid robot for testing chemical protective clothing.

- Journal of the Robotics Society of Japan*, 2012, 30(4): 372-377
- [4] Dedonato M, Dimitrov V, Du R X, et al. Human-in-the-loop control of a humanoid robot for disaster response: a report from the DARPA robotics challenge trials. *Journal of Field Robotics*, 2015, 32(2): 275-292
- [5] Fallon M, Kuindersma S, Karumanchi S, et al. An architecture for online affordance-based perception and whole-body planning. *Journal of Field Robotics*, 2015, 32(2): 229-254
- [6] 于昂可. 液压驱动双足机器人机构设计及其步态仿真:[硕士学位论文]. 杭州:浙江大学机械工程学院, 2015. 19-48
- [7] 王春兰. 液压驱动四足机器人的关节控制:[硕士学位论文]. 济南:山东大学控制科学与工程学院, 2010. 7-43
- [8] 李贻斌, 李彬, 荣学文等. 液压驱动四足仿生机器人的结构设计和步态规划. *山东大学学报(工学版)*, 2011, 41(5): 32-36 + 45
- [9] 王立鹏. 液压四足机器人驱动控制与步态规划研究:.[博士学位论文]. 北京:北京理工大学自动化学院, 2014. 19-45
- [10] 闫继宏, 郭鑫, 刘玉斌等. 一种模块化机械臂的设计与运动学分析. *哈尔滨工业大学学报*, 2015, 47(1): 20-25
- [11] 姜宏超, 刘士荣, 张波涛. 六自由度模块化机械臂的逆运动学分析. *浙江大学学报(工学版)*, 2010, 44(7): 1348-1354
- [12] 王帅军. 模块化机械臂设计及其路径规划方法研究:[硕士学位论文]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学机电工程学院, 2015. 1-25
- [13] 丁渊明. 6R 型串联弧焊机器人结构优化及其控制研究:[博士学位论文]. 杭州:浙江大学机械工程学院, 2009. 9-20
- [14] 李研彪, 金振林, 计时鸣. 一种新型 3-DOF 串并混联拟人机械臂的研制. *中国科学(E 辑:技术科学)*, 2009, 12: 1983-1991
- [15] 李世其, 刘洋, 朱文革等. 多关节轻型机械臂的设计研究. *航天器工程*, 2009, 18(3): 48-52
- [16] 郭炬. 串联多关节机械臂设计与分析:[硕士学位论文]. 武汉:华中科技大学机械科学与工程学院, 2008. 7-12

Design of a hydraulic-driven manipulator and analysis of its joint driving

Gao Jinpeng^{*}, Xiong Hegen^{*}, Tao Yong^{**}, Liu Hui^{**}, Xie Guang^{*}

(^{*} School of Machinery and Automation, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430000)

(^{**} School of mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191)

Abstract

A new 6-DOF serial manipulator was designed, and its joint driving control method based on hydraulic swing cylinder was proposed. The manipulator arm is driven by two hydraulic cylinders which are perpendicular to each other, and the control signals are given by the closed loop control system which uses hydraulic drive and consists of the host computer, signal control card and potential sensor. The manipulator's 3-D model was constructed, the kinematics modeling was conducted by using the D-H method, and the forward kinematics analysis was performed. Finally, the experimental analysis of the manipulator joint control method based on hydraulic swinging cylinder was carried out, and the relationship between the running speed of the manipulator's joints and the duty cycle of the pulse width modulation (PWM) governor is obtained. The experiment gave the corresponding joint motion relationships to provide the references for the study of the control of series manipulator position and the motion path of a manipulator.

Key words: series manipulator, hydraulic swing cylinder, control of joint driving, D-H kinematic equation, pulse width modulation (PWM) duty cycle, speed regulation