

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.07.005

液压驱动四足机器人步态规划和运动控制^{*}

殷勇华, 卞新高^{*}, 陆卫丽

(河海大学 机电工程学院, 江苏 常州 213022)

摘要:针对液压缸运动加速度突变影响四足机器人运动平稳性的问题,对液压缸的加减速控制方法进行了分析,对液压缸的运动平稳性和特性等方面进行了研究,提出了 7 次位移曲线控制方法作为液压缸的位移控制规律。根据运动稳定裕量原则规划了四足机器人的直行步态,保证三足支撑机体时稳定裕量为 75 mm。利用 ADAMS 仿真软件对所设计步态进行了仿真,分析对比了步态的运动学量、动力学量和位移控制规律的运动特征曲线,验证了步态的可行性。在四足机器人原理样机上进行了实验调试,并将试验与仿真结果进行了比较。研究结果表明,机器人能够根据规划的步态完成多个循环的稳定行走,通过 7 次位移曲线的应用提高了机身在整个行走过程中的平稳性。

关键词:四足机器人;液压驱动;步态分析;7 次位移曲线

中图分类号:TH137.9;TP242

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2014)07-0839-05

Gait planning and motion control on the hydraulic pressure actuated quadruped robot

YIN Yong-hua, BIAN Xin-gao, LU Wei-li

(College of Mechanical & Electrical Engineering, Hohai University, Changzhou 213022, China)

Abstract: Aiming at the impact and shock of robot's body which were caused by the motion acceleration mutation of hydraulic cylinder, acceleration and deceleration control methods for hydraulic cylinder was analyzed, the motion stability and characteristics of hydraulic cylinder were studied, and the septic curve control method was presented and used as motion displacement control law of every degree of freedom. Straight gait of the quadruped robot was planned by the principle of motion stability margin, and the stability margin was guaranteed for 75 millimeters when the robot's body was sustained by three legs. The simulation of the designed gaits, analysis and comparison of the kinematics and dynamics characteristics and the motion characteristics curves were done using simulation software. The results of experiments which were done on the prototype of quadruped walking robot were compared with the simulations'. The results indicate that the designed gait is feasible and the JQR100 walks stably for cycles. Moreover, the septic curve used as displacement control makes the body more stable during the movement.

Key words: quadruped robot; hydraulic actuation; gait analysis; septic curve

0 引言

目前,常见的步行机器人以两足式、四足式、六足式应用较多。其中,四足机器人机构简单且灵活,承载

能力强、稳定性好,在抢险救灾、探险、娱乐及军事等诸多方面有很好的应用前景,其研制工作一直受到国内外的重视^[1]。

由于足式机器人的步行稳定性主要取决于步

收稿日期:2014-01-13

基金项目:国家水利部公益性行业科研专项资助项目(200701033)

作者简介:殷勇华(1989-),男,江苏泰州人,主要从事机电控制方面的研究。E-mail:yonghua1989@yeah.net

通信联系人:卞新高,男,副教授,硕士生导师。E-mail:bianxingao@163.com

态^[2],为了获得良好的稳定性,许多学者致力于机器人步态的分析研究。新加坡国立大学研究的双足机器人^[3]主要采用 ZMP(Zero Moment Point)理论规划机器人稳定动态行走步态。ZMP 点是指在机器人的支撑平面内,机器人合力矩为零的点。通过规划机器人在行走过程中 ZMP 点始终落在支撑区域内使机器人稳定动态行走。文献[4]通过分析四足机器人 24 种步态的 3 个基本特性参数:运动空间需求、最大稳定裕度以及机器人的运动协调性,得到最优步态以保证机器人的步行稳定性,同时,通过使用基于遗传算法的进化学习方法对步态控制参数进行优化获取最优步态。也有学者提出了一些重心调整的方法来提高机器人的稳定性。

本研究在能够保证机器人稳定行走的步态基础上,针对液压动作的四足机器人,分析提出通过将 7 次位移曲线应用于各自由度的位置控制,减小机器人步行中的振动,以进一步提高四足机器人步行时的稳定性。

1 四足机器人结构

本研究实验室自行设计的 JQRI00 型四足机器人^[5]模型样机运动机构三维造型图和实物图如图 1 所示。机器人由机体及 4 条腿组成,4 条腿完全相同,箭头所示方向为设定的前进方向,将四条腿依次编为 1—2—3—4 号,对应为左前腿-右前腿-左后腿-右后腿,三维造型图如图 1(a)所示。驱动方式为液压驱动,每条腿由 3 个液压缸驱动,分别为 P、Q、L,共计 12 个液压缸,即该机器人有 12 个运动自由度。其中,P 缸控制足端的横向移动,Q 缸控制腿的升降,L 缸控制腿的前后摆动。

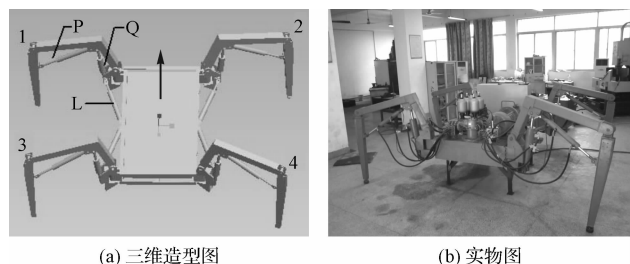


图 1 JQRI00 型四足机器人三维造型图和实物图

2 四足机器人步态规划

机器人通过腿的抬跨以及机身的移动完成行走,而稳定的行走对腿抬跨过程中足端在各结点(起始点、路径点和着地点)上的位姿、速度、加速度以及加加速度都提出了较高的要求。液压缸整个运动过程中

的位移、速度、加速度以及加加速度需具备连续性^[6],在过渡点处最好没有突变现象,从而进一步减小液压缸的冲击以提高机器人的运动平稳性。

液压缸的运动要求需要 8 个条件加以满足,当应用插值多项式来满足这些条件进行运动轨迹的逼近时,该多项式的次数最小为 7 次^[7]。若已知的液压缸运动起始位移值 s_0 、终止位移值 s_1 以及时间间隔 T ,可得到液压缸在 T 时间内产生位移量 $A = s_1 - s_0$ 的公式:

$$s\left(\frac{t}{T}\right) = A \left[-20\left(\frac{t}{T}\right)^7 + 70\left(\frac{t}{T}\right)^6 - 84\left(\frac{t}{T}\right)^5 + 35\left(\frac{t}{T}\right)^4 \right] \quad (1)$$

本研究选择“1—2—4—3”的迈腿顺序,在相同的占空比条件下,该迈腿顺序稳定性较好。机器人一个周期内的步态如图 2 所示,分为 5 步,取步距为 400 mm,起步位姿如图 2(a)所示,初始稳定裕量^[8-9]为 75 mm,箭头所示方向为机器人的前进方向。具体的步态介绍如下:

(1)腿 1 抬跨,稳定裕量为 75 mm,机身相对地面无移动,足尖相对于机身移动 400 mm,如图 2(b)所示。

(2)腿 2 抬跨,稳定裕量为 75 mm,三足支撑同时机身前移 50 mm,足尖相对于机身移动 350 mm,如图 2(c)所示。

(3)四足支撑同时机身前移 300 mm,确保下一次腿抬跨时机器人重心落在稳定三角形区域内,如图 2(d)所示。

(4)腿 4 抬跨,稳定裕量为 75 mm,三足支撑同时机身前移 50 mm,足尖相对于机身移动 350 mm,如图 2(e)所示。

(5)腿 3 抬跨,稳定裕量为 75 mm,机身相对地面无移动,足尖相对于机身移动 400 mm,回到初始位姿,如图 2(f)所示。

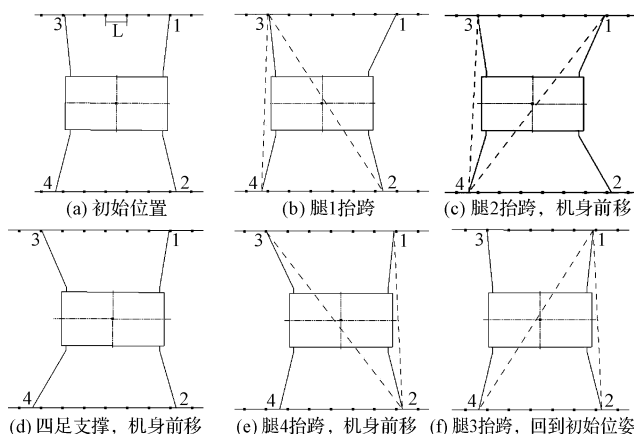


图 2 JQRI00 四足机器人直行步态规划

机器人各腿抬跨后,足端相对于地面移动400 mm,机身共进行了3次重心调整,共计向前移动400 mm,与步距相等。机器人每条腿抬跨时间和四足支撑机身重心调整

时间均为2 s,因此机器人直行步态的行走周期为10 s,占空比为0.8,机器人行走的平均速度为40 mm/s。
机器人规划步态的具体说明如表1所示。

表1 直行步态各步动作

t/s	0~2		2~4		4~6	6~8		8~10	
腿	0~1	1~2	2~3	3~4	4~6	6~7	7~8	8~9	9~10
腿1	↗	↓			各腿 P、L 缸同时 动作,完成机身前 移				
腿2			↗	↓					
腿3								↗	↓
腿4						↗	↓		
机身			→		→		→		

注:↗—Q 缸伸长完成腿的抬起,同时 P、L 缸动作完成腿的摆动;↓—Q 缸缩短,腿下落;→—各腿 P、L 缸同时动作,机身前移。

本研究采用7次位移曲线作为JQRI00四足机器人各运动自由度的运动控制规律,将规划的各液压缸动作的相对位移值代入式(1)。根据机器人的动作要求设定 $T=1\text{ s}$ 。以腿1为例,在一个步态周期中腿1的Q缸只在0~2 s内动作,0~1 s:上升20 mm;1 s~2 s:下降20 mm。因此,将7次位移曲线写入IF函数得到Q缸的驱动函数,函数中0~1 s为仿真中模型的位姿调整时间:

if(time-1:0,0,if(time-2:(-20*(time-1)**7+70*(time-1)**6-84*(time-1)**5+35*(time-1)**4)*20,20,if(time-3:(-20*(3-time)**7+70*(3-time)**6-84*(3-time)**5+35*(3-time)**4)*20,0,0)))

笔者运用同样的方法编写其余液压缸的驱动函数。

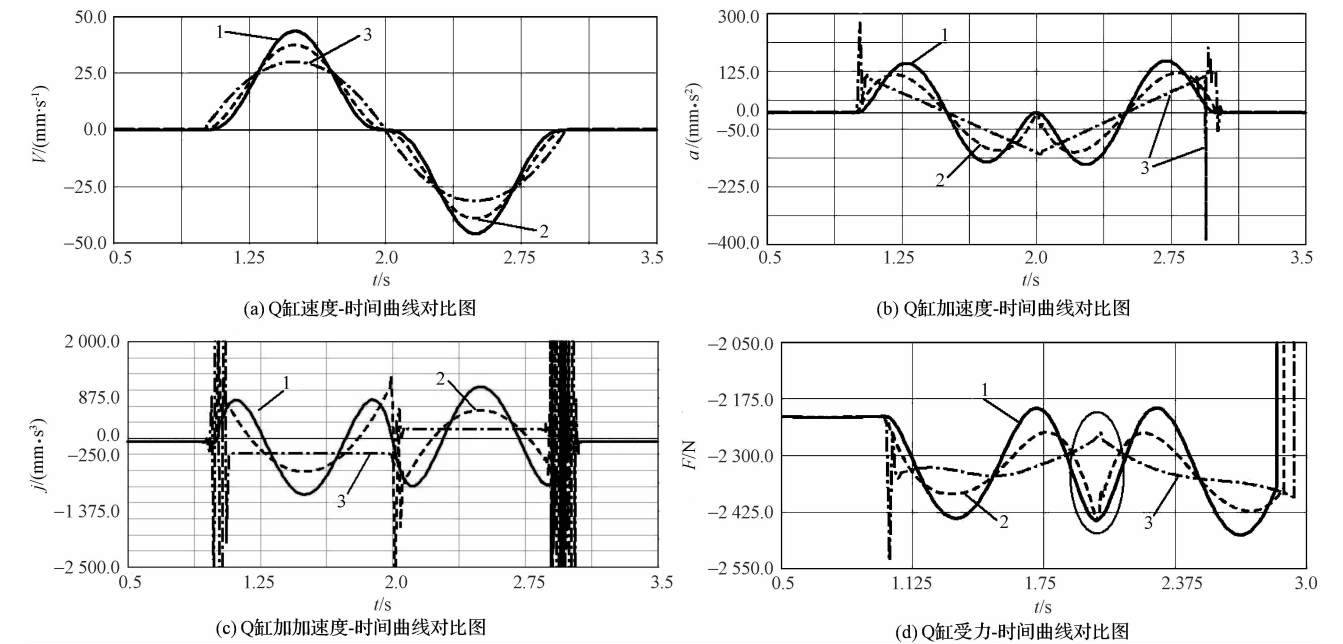


图3 对比图

注:图中标注的曲线1、2、3—采用7次位移曲线、S曲线和STEP阶跃函数作为Q缸位移控制规律得到的运动学量(速度、加速度、加加速度)、动力学量(力)的曲线图。

3.2 四足机器人仿真分析

如图 3(a)所示:速度曲线均十分平滑,液压缸在运动过程中十分平稳,但采用 STEP 阶跃函数得到的速度在开始和结束位置出现尖点,即其在始末位置过渡不平滑。

如图 3(b)所示:采用 7 次位移曲线得到的加速度在整个运动过程中(包括始末位置)过渡平滑;采用 S 曲线得到的加速度只在液压缸由伸长到缩短的转折处出现尖点,过渡不平滑;采用 STEP 阶跃函数得到的加速度在始末位置发生突变,转折处出现尖点,过渡不平滑。

如图 3(c)所示:采用 7 次位移曲线得到的加加速度在整个运动过程中(包括始末位置)过渡平滑;而采用 S 曲线、STEP 阶跃函数得到的加加速度在始末位置及转折处均发生突变,过渡不平滑。

影响液压缸运动平稳性的主要因素是加速度和加加速度,综上所述,采用 S 曲线、STEP 阶跃函数时的加速度、加加速度曲线均存在尖点或突变,使得整个运动过程不够平稳,液压缸受到较大柔性冲击;采用 7 次位移曲线时的加加速度、加速度及速度曲线连续且平滑,保证了运动的平稳性,大大减小了液压缸的柔性冲击。

如图 3(d)所示:采用 7 次位移曲线时,整个运动过程中液压缸受力平稳,没有突变现象,过渡平滑;采用 S 曲线时液压缸受力在转折处出现尖点,过渡不平滑;采用 STEP 阶跃函数时液压缸受力在始末位置发生突变,在转折处出现尖点,运动过程中存在较大的冲击。液压缸的受力对比分析表明,7 次位移曲线应用于位移控制更为优越。

上述分析表明,将 7 次位移曲线作为机器人液压缸的位移控制规律,具有更好的运动学和动力学特性,提高了机器人的行走稳定性。仿真中机器人能够平稳地完成沿直线的行走。

4 四足机器人行走实现

根据所设计的步态和仿真分析结果,本研究在 JQRI00 型四足行走机器人原理样机进行试验验证,利用 PI 算法^[13-14]对 7 次位移曲线进行调节。

鉴于各腿 P 缸、L 缸规格型号相同,Q 缸规格型号相同,试验所得参数也基本一致,笔者选取左前腿 P 缸与 Q 缸伸长缩短时的位移、速度曲线进行说明。电磁比例换向阀是通过控制正反向线圈中的电流大小来实现控制液流的方向与流量大小的,而速度曲线又由与正反线圈串联的采样电阻上的电压进行反馈,因此,

液压缸伸长、缩短时的速度曲线都为正,但表示的是不同线圈中的电流大小。左前腿 P 缸伸长与缩短时的位移、速度曲线如图 4 所示。左前腿 Q 缸伸长与缩短时的位移、速度曲线如图 5 所示。

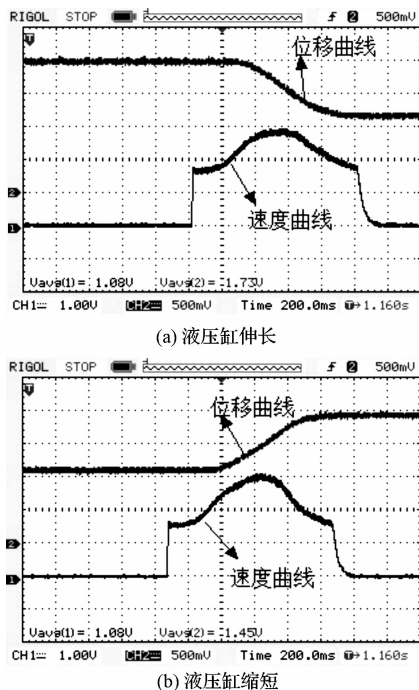


图 4 P 缸速度、位移曲线

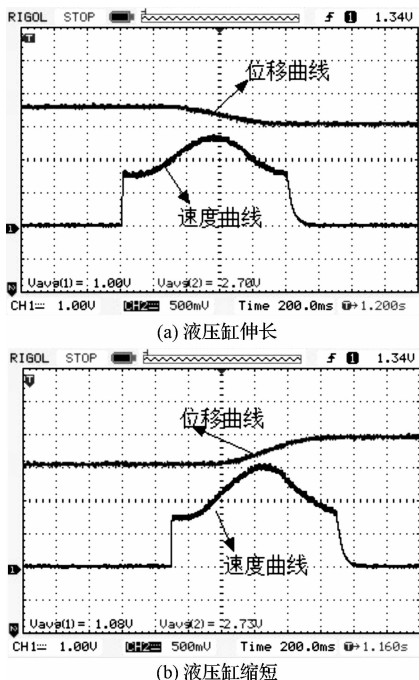


图 5 Q 缸速度、位移曲线

由图 4、图 5 可知,笔者设计的位置闭环控制系统通过将 7 次位移曲线的液压缸动作规划与 PI 控制相结合,达到了预期的效果。液压缸具有响应速度快、运动过程平稳无冲击等优点。

5 结束语

本研究规划了四足机器人的步态,通过 Pro/E 和 ADAMS 软件建立虚拟样机,并利用 ADAMS 软件进行了步态仿真、运动学和动力学分析,论证了步态规划的可行性和利用 7 次位移曲线对液压缸进行位置控制的优越性。基于理论分析结果,笔者在四足机器人原理样机上进行调试试验。仿真与试验结果表明,本研究通过采用 7 次位移曲线消除了液压缸运动加速度和加加速度的突变,液压缸的动作冲击大大减小,四足机器人具有良好的稳定性。

参考文献 (References):

[1] 王吉岱,卢坤媛,徐淑芬,等. 四足机器人研究现状及展望[J]. 制造业自动化,2009,31(2):4-6.

[2] 马东兴,王延华,岳林. 新型四足机器人步态仿真与实现[J]. 机械制造与自动化,2008,37(3):30-33.

[3] ZHANG Ru-xiang, VADAKKEPAT P. An Evolutionary Algorithm for Trajectory Based Gait Generation of Biped Robot [D]. Kent Ridge: Department of Electrical and Computer Engineering, National University of Singapore. ,1999.

[4] 黄博. 四足机器人行走步态及 CPG 控制研究[D]. 哈

尔滨:哈尔滨工业大学机电工程学院,2007.

[5] 陆卫丽,卞新高,焦建,等. 四足爬行机器人步态分析与运动控制[J]. 机电工程,2012,29(8):886-889.

[6] XV T, CHEN Q. Learning gait of quadruped robot without prior knowledge of the environment[J]. **Chinese Journal of Mechanical Engineering**, 2012,25(5):1068-1074.

[7] 陈伟华,张铁,崔敏其. 基于五次多项式过渡的机器人轨迹规划的研究[J]. 煤矿机械,2011,32(12):49-50.

[8] 谭胜龙. 轨迹快速实现机器人设计[J]. 机电工程技术, 2012,11(1):64-67.

[9] 徐铁群,万隆君. 四足步行机器人稳定性步态分析[J]. 制造业自动化,2001,23(8):5-7.

[10] 张碧陶,高伟强,沈列,等. S 曲线加减速控制新算法的研究[J]. 机床与液压,2009,37(10):27-29.

[11] 晏祖根,王瑞泽,孙智慧,等. 四自由度并联机器人运动学分析[J]. 包装与食品机械,2014(2):34-36,57.

[12] 刘宏伟. 基于 ADAMS 的五自由度机器人运动学仿真[J]. 制造业自动化,2009,31(3):73-75.

[13] 黄克亚,陈庆. 基于数字 PID 算法的机器人运动控制[J]. 自动化应用,2012(12):73-75.

[14] 于蓬,张为春,裴宝浩. 抢险机器人手臂机液耦合仿真分析[J]. 液压气动与密封,2011,39(6):29-33.

[编辑:张豪]

本文引用格式:

殷勇华,卞新高,陆卫丽. 液压驱动四足机器人步态规划和运动控制[J]. 机电工程,2014,31(7):839-843.

YIN Yong-hua, BIAN Xin-gao, LU Wei-li. Gait planning and motion control on the hydraulic pressure actuated quadruped robot[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014,31(7):839-843.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第 822 页)

4 结束语

为了提高特高压断路器传动机构的性能,本研究对传动机构进行了效率优化分析,主要结论如下:

- (1)对于复杂的机构进行分解简化,该特高压断路器传动机构可分解为由 4 组偏距-摇杆滑块机构串联组成。
- (2)通过对特高压断路器机构进行分析,建立效率计算模型,通过对其进行优化,可将其效率提高 6% 以上。
- (3)特高压断路器传动机构的连杆与摇杆的夹角在 90°附近范围内变化时效率较高;使铰接处旋转的角度变小可提高效率,但是在满足行程的要求下,不可避免地要增加杆件的尺寸,需要综合考虑。

参考文献 (References):

[1] THOMPSON B. An Experimental and Analytical Study of the Dynamic Response of a Linkage Fabricated From A Unidirectional Fiber-reinforced Composite Laminate [C]// American Society of Mechanical Engineers, Design and Production Engi-

neering Technical Conference. Washington, DC: [s. n.], 1982;526-533.

[2] 杨侠,宋晶. 四连杆抽油机传动机构的结构计算与优化[J]. 机电工程,2013,28(9):89-92.

[3] 周仲荣. 摩擦学发展前言[M]. 北京:科学出版社,2006.

[4] 张策. 弹性连杆机构的分析与设计[M]. 北京:机械工业出版社,1989.

[5] 吕庸厚. 按机构效率设计直动从动杆的凸轮机构[J]. 食品与生物技术学报,1983,2(1):38-39.

[6] 徐国政,张节容. 高压断路器原理和应用[M]. 北京:清华大学出版社,2008.

[7] 张策. 机械动力学[M]. 北京:高等教育出版社,2008.

[8] 王志明. 八连杆振动机构振动特性理论的研究[J]. 机械工程学报,1999,35(4):135-141.

[9] 王松. 双曲柄连杆机构柴油机的摩擦损失分析[J]. 哈尔滨工程大学学报,2002,23(5):42-46.

[10] 陈杰. 特高压断路器连杆传动机构非线性特性研究[D]. 武汉:武汉大学动力与机械学院,2013.

[11] 周仲荣. 摩擦学发展前言[M]. 北京:机械工业出版社,2006.

[编辑:张豪]