



中国机械工程
China Mechanical Engineering(中国机械工程)
ISSN 1004-132X,CN 42-1294/TH

《中国机械工程》网络首发论文

题目: 液压四足机器人足端变期望力与姿态平稳性研究
作者: 李冰, 张永德, 袁立鹏, 朱光强, 代雪松, 苏文海
网络首发日期: 2020-10-16
引用格式: 李冰, 张永德, 袁立鹏, 朱光强, 代雪松, 苏文海. 液压四足机器人足端变期望力与姿态平稳性研究. 中国机械工程.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1294.TH.20201016.1437.010.html>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

液压四足机器人足端变期望力与姿态平稳性研究

李 冰¹ 张永德¹ 袁立鹏² 朱光强³ 代雪松¹ 苏文海³

1. 哈尔滨理工大学机械动力工程学院, 哈尔滨, 150080

2. 哈尔滨工业大学机电工程学院, 哈尔滨, 150001

3. 东北农业大学工程学院, 哈尔滨, 150030

摘要：针对液压四足机器人在坚硬路面行走时，其足端位置跟踪固定期望力方式易引起足端与坚硬路面的刚性冲击，影响其机身行走姿态的平稳性，提出了一种液压四足机器人足端变期望力的预测跟踪方法。首先，在分析液压四足机器人结构与原理的基础上，通过运动学模型与力学模型构建了液压伺服系统控制模型；然后，根据足端变期望力规划方法的设计要求，采用改进自适应布谷鸟（CS）优化 BP 神经网络算法（改进自适应 CS-BP）建立大/小腿的液压伺服系统位移变化量与足端力之间的关系函数，构建足端变期望力的预测跟踪模型；同时，利用 Matlab2016a 软件使改进自适应 CS-BP 分别与 BP、Fuzzy-BP 及 PSO-BP 进行仿真对比分析，验证所提出算法的可行性；最后，通过液压四足机器人试验样机进行足端柔顺力及刚性地面行走姿态平稳性测试，验证了液压四足机器人足端变期望力的预测跟踪方法及改进自适应布谷鸟优化 BP 神经网络算法建立足端变期望力的预测跟踪模型的有效性，增强了腿部力柔顺性，减小了液压四足机器人在坚硬路面行走时的俯仰、翻转、航偏角度，有效提高了行走姿态平稳性。研究结果为液压四足机器人的姿态平稳性控制方面的相关研究提供了参考。

关键词：液压四足机器人；阻抗控制；改进自适应布谷鸟算法；BP 神经网络；足端变期望力

中图分类号：TP242.6

Study on Time-Varying Expected Force at Foot-Bottom and Attitude Stability of Hydraulic Quadruped Robot

LI Bing¹ ZHANG Yongde¹ YUAN Lipeng² ZHU Guangqiang³ DAI Xuesong¹

基金项目：国家自然科学基金资助项目（51675142）；

黑龙江省自然科学基金重点项（ZD2018013）；国家科技支撑计划项目（2013BAH57F01）

SU Wenhai³

1. School of Mechanical and Power Engineering, Harbin University of Science and

Technology, Harbin, 150080

2. School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001

3. College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin, 150030

Abstract: According to this situation when the hydraulic quadruped robot walks on the rigid pavement, its terminal position of the foot is usually followed by the fixed expected force. This method is easy to make the rigid impact between the foot end and the hard road, and the stability of the body posture of the robot is affected. In this paper, a predictive tracking method for time-varying expected force of foot-bottom of hydraulic quadruped robot is proposed. Firstly, based on the analysis of the structure and principle of it, the control model of the hydraulic servo system is built through kinematic model and mechanical model; This paper proposes an algorithm that improved adaptive cuckoo (CS) optimization BP neural network (improved adaptive CS-BP) to establish the relation function between displacement variation of hydraulic servo system for thigh/calf and force of the foot-bottom, and the purpose is to construct a predictive tracking model of the time-varying expected force of the foot-bottom; At the same time, in order to verify the feasibility of the proposed algorithm, and the improved adaptive CS-BP was compared with BP, Fuzzy-BP and PSO-BP by using Matlab2016a software. Finally, the experimental prototype of the hydraulic quadruped robot was used to test the stability of rigid ground walking attitude and the foot flexibility for force, The effectiveness of the predictive tracking method for the time-varying expected force of the hydraulic quadruped robot and the improved adaptive cuckoo optimized BP neural network algorithm to establish the predictive tracking model for the variable expected force of the hydraulic quadruped robot were verified, increased leg flexibility for force, and when the hydraulic quadruped robot walks on the hard road, its pitching, turning and navigation deviation Angle are reduced, and it effectively improves the stability of walking posture. The research result of this paper provides a reference for the research of attitude stability control of hydraulic quadruped robot.

Key words: hydraulic quadruped robot; impedance control; improved adaptive cuckoo algorithm; BP neural network; time-varying expected force of foot-bottom

0 引言

液压四足机器人以液压伺服作动器作为驱动原件,具有反应快、重量轻、尺寸小、结构紧凑及承受负载能力强等优点,在工业、农业运输等高负载场合具有广泛应用^[1,2]。液压四足机器人足端与环境间的约束关系,影响其运动姿态的稳定性^[3,4]。当液压四足机器人在正常或可变负载方式

行走时,由于实际足端位置力的不断变化,在坚硬路面行走时容易引起机身姿态的不稳定,故影响其作业性能。为保证液压四足机器人行走姿态的平稳性,需要对其足端位置进行变期望力控制研究。

目前,关于液压四足机器人行走姿态平稳性的力柔顺控制方法主要是基于阻抗控制策略。李

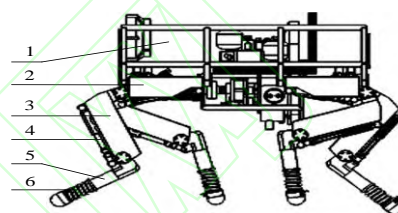
鑫^[5]、张国腾等^[6]采用基于惯性-刚度-阻尼模型的阻抗控制策略，通过调节其阻抗参数实现腿部的柔顺性；但液压伺服系统具有系统非线性及参数时变性等特点，故其末端位置力跟踪仍存在稳态误差；丁庆朋等^[7]提出一种自适应阻抗控制策略，可对环境刚度及环境位置进行辨识，补偿期望位置，有效降低末端位置力跟踪稳态误差；苏文海等^[8]提出一种基于复合粒子群自适应液压伺服系统力跟踪阻抗控制策略，可以快速的跟踪末端位置期望力，能够对于不同环境模型的运行条件下，提高其力跟踪的动态性能。此外，俞滨等^[9]针对不同环境结构下负载刚度和负载阻尼的动态变化特性提出一种变刚度和变阻尼负载特性的模拟方法、柯贤锋等^[10]研究了基于力反馈的位置型主动柔顺控制方法、邵璇等^[11]提出了基于动力学模型的机器人内力自适应抑制策略以及柴汇等^[12]提出一种足端力柔顺控制方法。他们主要是采用基于动力学结构模型原理对其腿部的力柔顺性进行控制，提高机身运动姿态的平稳性能。

上述研究学者对液压四足机器人腿部力柔顺性控制方法进行了分析研究，能够有效缓解其腿部与地面的刚性冲击。但是，液压四足机器人在坚硬路面行走时，足端位置在与地面接触时，其足端力是一种随时间变化的力，这种力也会造成液压四足机器人行走姿态的不稳定。为保持液压四足机器人的行走平稳性，需要对其足端变期望力的实时跟踪控制进行预测研究。目前关于液压四足机器人足端变期望力跟踪控制的相关研究较少，故本文提出一种液压四足机器人足端变期望力的预测跟踪方法。首先，根据液压四足机器人的结构与原理进行运动学分析，得到足端位置相对于各腿关节转角的变换方程，求出雅可比矩阵，进而建立其足端受到的地面作用力与关节力矩的关系式，并采用阻抗控制策略建立液压伺服系统末端位置变期望力跟踪的闭环控制；然后，通过位置控制试验，测出大腿、小腿液压缸的位移曲线与足端力的变化曲线，采用改进自适应布谷鸟优化 BP 神经网络算法(改进自适应 CS-BP 算法)

构建其足端变期望力的预测跟踪模型；最后，结合液压四足机器人试验样机进行了相关试验分析，验证液压四足机器人足端变期望力的预测跟踪方法对提高其机身姿态平稳性的有效性。

1 结构与原理

液压四足机器人的三维模型如图 1 所示，其整体结构可以表示为一种具有时变性特点的串-并联运动机构；当腿部运动处于摆动相时，可被看作一种串联机构；而在多腿支撑时又可视作具有冗余运动的并联机构^[13]。



1.机身 2.机节 3.大腿 4.液压伺服系统 5.小腿 6.弹性元件

图 1 液压四足机器人结构图

Fig. 1 Hydraulic quadruped robot structure diagram

液压四足机器人的结构主要由机身和四条相同结构的腿组成，四条腿的安装方式采用前肘后膝式^[14,15]。每条腿的结构包括机节、大腿和小腿。因此，每条腿由三个液压缸驱动。同时，在足底部安装弹性元件，使液压四足机器人在行走过程中，减轻了在落地时足端对腿部关节产生强烈的刚性冲击^[16]。其中，机节控制侧摆位移，大腿和小腿控制前进距离及抬腿高度。

2 数学模型的建立

2.1 运动学模型

建立液压四足机器人的单腿运动学模型是实现其腿部关节转角与足端位置之间相互变换的常用分析方法。因此,采用 D-H 法、齐次变换矩阵来描述相邻连杆之间的位姿关系^[17]。以前进方向左前腿为例,建立如图 2 所示的连杆坐标系。

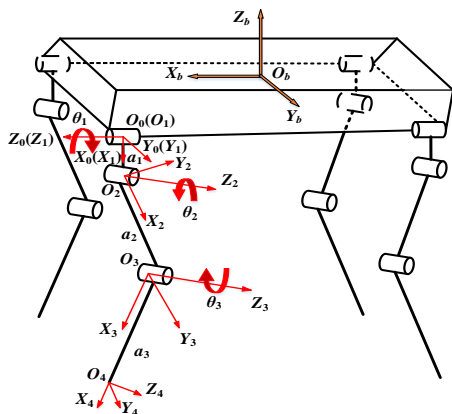


图 2 液压四足机器人 D-H 坐标图

Fig. 2 D-H coordinate diagram of hydraulic quadruped robot

图中 $O_bX_bY_bZ_b$ 为机身坐标系,以前进方向左前腿为例,基坐标系 $O_0X_0Y_0Z_0$ 建立在侧摆关节上,侧摆关节坐标系 $O_1X_1Y_1Z_1$ 建立在基坐标上,大腿、小腿以及足端坐标系 $O_2X_2Y_2Z_2$ 、 $O_3X_3Y_3Z_3$ 、 $O_4X_4Y_4Z_4$ 分别建立在前一个连杆末端之上。各关节坐标系的 Z_i 轴沿关节轴方向, X_i 轴沿连杆方向,其中 $i=1\sim 4$, 且足端坐标与小腿坐标平行。

其中各关节坐标系 Z 轴指向关节轴线, X 轴指向连杆,足端坐标与小腿坐标平行,各连杆变换参数如表 1 所示。

表 1 液压四足机器人左前腿的 D-H 坐标参数

Tab.1 D-H coordinate parameters of the left front leg of the hydraulic quadruped robot

连杆 i	连杆长度 l/mm	关节扭角 $\alpha_{i-1}/(^{\circ})$	关节距离 d_i/mm	关节角变化范围 $\theta_i/(^{\circ})$
1	0	0	0	-90~90
2	42	-90	0	-90~90
3	230	0	0	-90~90

4	190	0	0	0
---	-----	---	---	---

根据图 2 建立的运动学坐标及表 1 定义的参数,采用 Paul^[18]变换法可以得到液压四足机器人单腿运动学正解表达式:

$${}^0T_4 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 \quad (1)$$

$${}^0T_4 = \begin{bmatrix} a_1c_{23} & -a_1s_{23} & -s_1 & c_1(a_1+a_2c_2+a_3c_{23}) \\ s_1c_{23} & -s_1s_{23} & c_1 & s_1(a_1+a_2c_2+a_3c_{23}) \\ -s_{23} & -c_{23} & 0 & -a_2s_2-a_3s_{23} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, $s_1=\sin(\theta_1)$; $s_2=\sin(\theta_2)$;

$c_1=\cos(\theta_1)$; $c_2=\cos(\theta_2)$;

$s_{23}=\sin(\theta_2+\theta_3)$; $c_{23}=\cos(\theta_2+\theta_3)$ 。

由于液压四足机器人的每条腿共有 3 个自由度,所以在逆运动学方程求解时存在多解,因而采用齐次矩阵反变换法来求解四足机器人单腿逆运动学方程,从而求出其足端位置相对于各关节转角(侧摆关节 θ_1 、大腿关节 θ_2 、小腿关节 θ_3)的变换方程。

$$\begin{cases} \theta_1 = \arctan(p_y / p_x) \\ \theta_2 = \arctan\left(\frac{k_2}{k_1}\right) - \arctan\left(\frac{k_3}{\sqrt{k_1^2 + k_2^2 - k_3^2}}\right) \\ \theta_3 = \arctan\left(\pm \frac{s_3}{c_3}\right) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $k_1=p_y s_1+p_x c_1-a_1$; $k_2=-p_z$; $k_3=a_3 s_3$;

p_x 、 p_y 、 p_z 分别表示设定的足末端位置相对于基坐标系的侧摆位移、抬腿高度和前进距离(足端位置齐次矩阵的原点矢量)。

2.2 力控制模型的建立

从控制角度来看,液压四足机器人的腿部机构是一个多变量、冗余、非线性的复杂力学系统。通过对如图 3 所示的足端位置力与关节力矩对应关系的分析,建立液压四足机器人足端力与关节力矩变换关系式。

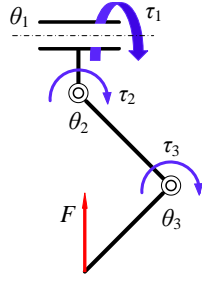


图3 足端力与关节力关系图

Fig. 3 Relation diagram of foot bottom force and joint force

因此,研究足端位置力与腿部关节力矩之间的变换关系是进行液压四足机器人腿部力控制、保持机身行走平稳性的前提和基础。若令足端位置的原点矢量为 $p = [p_x \ p_y \ p_z]^T$, 各腿的关节转角为 $\theta = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]^T$, 则根据 2.1 节推出的运动学模型可知二者之间的变换关系表示为:

$$\frac{dp}{dt} = J(\theta) \frac{d\theta}{dt} \quad (4)$$

式中: $J(\theta)$ 表示 3×3 的雅可比矩阵, 它的列向量分别是足端位置对各关节转角的偏导。结合运动学正解表达式 (2) 可得雅可比矩阵的形式如式 (5) 所示。

$$J(\theta) = \begin{bmatrix} \frac{\partial p}{\partial \theta_1} & \frac{\partial p}{\partial \theta_2} & \frac{\partial p}{\partial \theta_3} \end{bmatrix} \quad (5)$$

对于单腿而言, 我们可以假定液压四足机器人在模拟运行时, 足端只受地面的支持力、摩擦力和机架的水平反向的弹力, 则根据虚功原理 $\sum F_i \delta r_i = 0$, 得到足端受到的地面作用力与关节力矩的关系可以近似为^[19]

$$\tau = -J(\theta)^T F \quad (6)$$

式中, $\tau = [\tau_1 \ \tau_2 \ \tau_3]^T$ 为腿部关节力矩 (N·m); $F = [F_x \ F_y \ F_z]^T$ 为作用在足端的地面反力 (N)。

根据式 (6) 可知, 当液压四足机器人在足端落地时, 需要液压伺服系统末端位置力能够准确跟踪期望力 F_r , 保持其行走稳定性, 故需要得到准确的足端位置力 F 变化曲线, 进而通过雅可比

矩阵转换成关节力矩, 并根据余弦定理求出液压杆末端位置期望力 F_r 的变化曲线。

液压伺服系统在工作过程中, 液压缸末端位置为跟踪期望力 F_r , 采用基于位置的阻抗控制策略构成力闭环, 其力学公式为:

$$F_r - F_e = M_d \Delta \ddot{x}_m + B_d \Delta \dot{x}_m + K_d \Delta x_m \quad (7)$$

式中, F_e 为液压伺服系统末端位置变化力; M_d 、 B_d 和 K_d 分别表示液压伺服系统的期望惯性、期望阻尼和期望刚度; Δx_m 为期望位置偏差, 其值为 $x - x_r$; 其中, x 为当前运动轨迹, x_r 为期望运动轨迹。

因此, 可得图 4 所示的基于位置的液压伺服系统末端位置力跟踪阻抗控制框图。

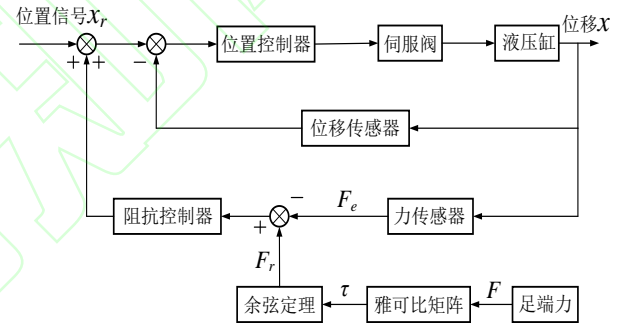


图4 位置力跟踪阻抗控制框图

Fig.4 Position force tracking impedance control block diagram

为保持液压四足机器人在行走时, 液压伺服系统末端位置变期望力跟踪的动态性能, 本文采用苏文海等^[20]提出的方法, 进行基于位置的液压伺服系统力跟踪阻抗控制策略研究。

3 足端变期望力规划方法与研究

根据上一节提出的采用跟踪足端预测变期望力的方法来有效缓解液压四足机器人在坚硬路面行走时足端与地面的刚性冲击, 提高液压四足机器人的运动姿态的平稳性。首先, 通过液压四足机器人进行位置控制行走试验, 测量液压伺服系统位移与足端力的变化关系; 然后, 以液压四足机器人前进行行走时的左前腿为例, 根据改进自适

应 CS-BP 算法建立大/小腿的液压伺服系统位移变化量与足端力之间的关系函数。

3.1 测试方法

3.1.1 测试样机简介

试验采用如图 5 所示为哈尔滨工业大学机电工程学院与常州迪华科技有限公司共同研制的液压四足机器人“KL”作为测试对象进行研究测试。在液压四足机器人“KL”中,各腿中每个液压伺服系统包含位移传感器与力传感器,每条腿的足端位置带有六维力传感器,用以测试当前步态下的力/位关系。

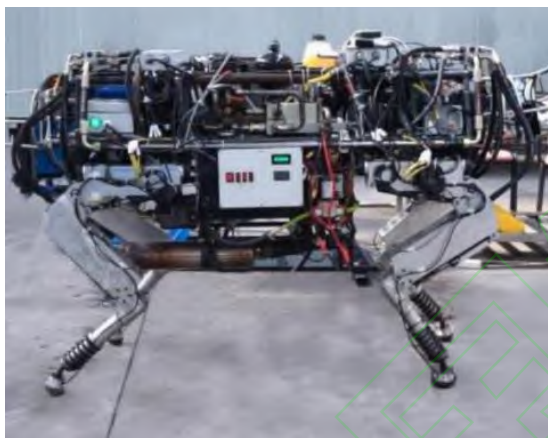


图 5 “KL”液压四足机器人

Fig. 5 "KL" hydraulic quadruped robot

3.1.2 控制器设计

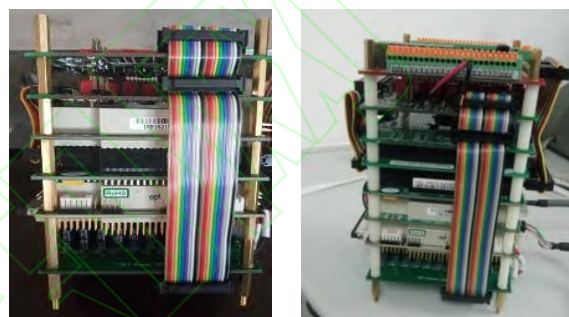
液压四足机器人“KL”的控制器设计中,采用计算机作为监控计算机,用于数据存储、监测与采集;

上位机软件为 Matlab-2016a; 上位机主控制器采用研华 PC104 作为主控计算机(见图 6 (a))负责处理数据,连接外置网卡,并通过网口通讯方式与监控计算机进行通讯,用于数据处理、实时控制程序的下载和启停逻辑控制等,并将激励信号传输给下位机控制器;

下位机(如图 6 (b) 所示,共四个),采用研华 PC104 作为下位机的主控计算机,并采用 XPC

作为下位机的实时控制系统,它能很好的兼容上位机 Matlab/Simulink 设计的算法程序;整个程序的开发过程及控制器算法的更改均在统一的 Matlab/Simulink 框架下,开发效率高,能够保证所设计控制算法的实时性要求。一旦控制器确定程序,即可生成、固化、定型。

下位机控制器中的 HIT-PC104-HXL-P515 板卡用于采集每个关节的力/位置传感器信号,并进行 A/D 转换; HIT-PC104-HXL-P520 板卡用于 D/A 转换产生液压阀控制信号;各板卡驱动用嵌入式 C++编写 S-Function 模块。



(a) 上位机主控制器

(b) 下位机控制器

图 6 控制器硬件

Fig.6 Hardware of the controller

3.1.3 测试过程

通过“KL”液压四足机器人进行位置控制行走试验,试验场地选择刚度较高的混凝土地质,试验步态选择 Trot 步态,步态周期为 2s,控制器的采样时间为 1ms。

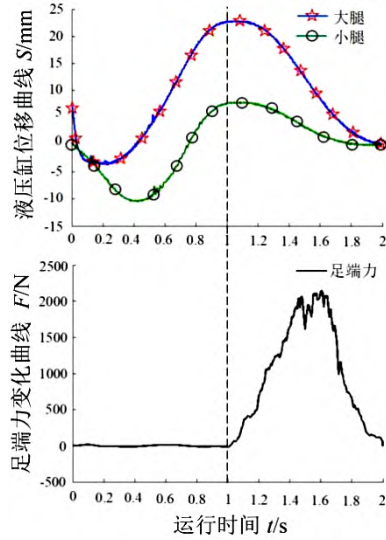


图 7 大/小腿位移与足端力变化关系曲线图

Fig.7 Relation curve of large/calf displacement and foot bottom force

然后,通过位移传感器、力传感器测其在一个步态位置运动周期时的足端位置力变化数据并记录,结果如图 7 所示。

根据图 7 所示的测试结果,本文采用改进自适应 CS-BP 算法对其进行训练与测试,建立以大腿、小腿位移变化量作为输入信号的足端位置期望力变化函数。从图中可以看出“KL”液压四足机器人足端在处于摆动相时,足端力为 0N;处于支撑相时,足端期望力存在规律性的变化,其最大值约为 2000N。

3.2 改进自适应 CS 优化 BP 神经网络算法

3.2.1 BP 神经网络

BP 神经网络是一种按误差逆传播算法训练的多层前馈网络,具有并行结构和学习能力,对应外部激励,能给出相应的输出。根据文献[21-24]的研究可知,一个单隐含层的 BP 网络能够逼近任意一个闭区间内的连续函数。所以,本文研究采用 BP 神经网络对 3.1 节所采集的数据进行函数的构建。

本文构建的 BP 神经网络算法采用三层结构:一个输入层、一个隐含层、一个输出层, $i=m=2$

表示输入层节点, $j=n=3$ 表示隐含层节点, $l=1$ 表示输出层节点,其中输入节点 x_1 、 x_2 为大腿液压缸位移变化信号,输出层 F_r 表示足端处于支撑相时的预测期望力,其拓扑结构如图 8 所示。

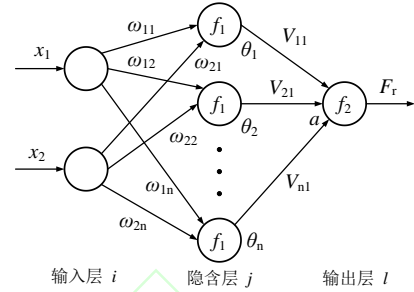


图 8 BP 神经网络结构图

Fig. 8 Structure diagram of BP neural network

根据图 8 所示, BP 神经网络算法的计算过程如下。

隐含层输入 net_j :

$$net_j = \sum_{i=1}^m \omega_{ij} y_i + \theta_j \quad (8)$$

隐含层输出 o_j :

$$o_j = f_1(net_j) = f_1\left(\sum_{i=1}^m \omega_{ij} y_i + \theta_j\right) \quad (9)$$

输出层输入 net_l :

$$net_l = \sum_{j=1}^n v_{jl} y_j + a = \sum_{j=1}^n v_{jl} f_1(net_j) + a \quad (10)$$

输出层输出 F_r :

$$F_r = f_2(net_l) \quad (11)$$

式中, f_1 、 f_2 为神经元活化函数,取正负对称的 Sigmoid 函数; ω_{ij} 为输入层到隐含层的连接权值, θ_j 为隐含层节点阈值; v_{jl} 为隐含层到输出层的连接权值, a 为输出层节点阈值。

3.2.2 布谷鸟 (CS) 算法

针对 BP 神经网络在实际应用中容易陷入局

部极值且学习及收敛速度慢, 导致误差过大, 以及 BP 神经网络在每次训练时的权值与阈值随机初始化, 导致训练结果不一致的情况。因此, 本文采用搜索效率高且全局搜索能力强的 CS 算法优化 BP 神经网络阈值和权值^[25-28]。CS 算法是按照布谷鸟寻巢产卵规律, 并兼有莱维飞行特点的一种新型启发式全局优化算法。CS 算法具有全局搜索能力强、收敛速度快、所含参数少、通用性和鲁棒性强等特点, 并广泛用于优化 BP 神经网络算法^[29-31]。

CS 算法的基本思想为当布谷鸟繁衍后代时, 每只布谷鸟通常只产一枚卵, 并随机产在其他鸟类的巢穴, 而一旦被宿主鸟以一定概率发现, 宿主鸟将放弃该巢穴, 建造新巢。因此, 布谷鸟算法规则如下:

1) 种群中每只布谷鸟每次产下一枚卵, 并且随机选择一个其他鸟类的寄生巢穴对卵进行孵化, 每个巢穴只接受一枚卵;

2) 在所有巢穴中, 布谷鸟蛋质量最好的将被保留到下一代;

3) 种群规模和鸟巢数量是一定的, 宿主鸟发现布谷鸟卵的概率为 $P_a = [0,1]$, 如果发生这种情况, 宿主可以丢弃蛋或巢, 从而在新的地点建造一个新的巢。

按照以上规则, 若该巢穴存在布谷鸟鸟蛋, 则该巢穴被视作一个解; 宿主鸟可能会把蛋扔掉或放弃巢穴, 建立一个全新的巢穴。故寻找最优解的过程就是不断用新的解来代替上一次较差的解。所以, 随机游走和莱维飞行被用于搜索和计算新的解。

所以, 布谷鸟搜索巢穴的路径和位置更新方式为

$$x_i^{(t+1)} = x_i^{(t)} + T \oplus L(\lambda) \quad (12)$$

式中: $x_i^{(t+1)}$ 表示第 t 代第 i 个巢穴的位置; T

为步长控制因子, 一般取 $T=1$; \oplus 表示点对点乘法; $L(\lambda)$ 表示莱维随机搜索路径。布谷鸟进行莱维飞行的随机搜索路径与飞行时间 t 的关系服从 Lévy 分布。

$$L(\lambda) \sim u = S^\lambda; 1 < \lambda \leq 3 \quad (13)$$

式中: u 服从正态分布; λ 为幂次系数; S 属于莱维飞行的随机步长, 通过莱维飞行进行位置更新并随机产生 0 到 1 的数 (记为 r), 令 r 与鸟窝的发现概率 P_a 进行比较, 若 $r > P_a$ 则继续进行位置更新, $r < P_a$ 则保留上一代的最优解。

3.2.3 改进自适应布谷鸟 (CS) 算法

在 CS 算法的参数中, 步长 α 和发现概率 P_a 能够帮助算法分别找到全局和局部改进的解, 可以用来调整 CS 算法的收敛速度^[32]。传统的 CS 算法对参数 P_a 和 α 设为定值。这种方法的主要缺点是迭代的次数不确定以及不能很好选择 P_a 和 α 的大小; 如果 P_a 的值较小, α 的值较大, 则算法性能较差, 导致迭代次数大幅度增加; 如果 P_a 的值较大, α 的值较小, 则收敛速度较快, 但可能无法找到最佳解。

为了提高 CS 算法的性能, 同时克服上述缺点, 本文引入自适应改进 CS 策略, 其关键在于动态调整 P_a 和 α 的值。在 CS 算法前期, P_a 和 α 的值必须足够大, 才能使算法增加解向量的多样性; 当 CS 算法进入到中、后期时, P_a 和 α 的值应逐渐减小, 从而提高搜索精度且保留适应值更好的解。 P_a 和 α 的值随着生成次数而动态地改变, 用式 (14) ~ (15) 表示, 其中 N 和 n 分别是总迭代次数和当前迭代次数。

$$P_a(n+1) = P_{a_max} - \frac{n}{N} \left[\frac{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_a(i) - P_{a_min} \right) (f - f_{min})}{f_{avg} - f_{min}} \right] \quad (14)$$

$$\alpha(n+1) = \alpha_{max} \cdot \exp\left[\frac{n}{N} \ln\left(\frac{\alpha(n)}{\alpha_{max}} \right) \right] \quad (15)$$

式中: f_{min} 表示当前最小适应度值; f_{avg} 表示当前平均适应度值

3.2.4 适应度函数

首先根据样本数据维数来确定 BP 神经网络的结构,包括权值和阈值的总数,进而确定改进自适应 CS 算法中搜索空间的维数。其次构造鸟巢坐标与神经网络权值和阈值之间的映射关系,将待确定的权值和阈值视为改进 CS 算法中有待寻找的鸟巢坐标,将所有鸟巢单体看成是权值和阈值的组合之一,且任意一个鸟巢的好坏都由适应度函数来决定。改进 CS 算法的目标就是找到一个最优的鸟巢坐标,使选取的适应度函数得到最小值。最后把该鸟巢坐标分量赋予 BP 神经网络以用作其权值与阈值来构建优化后的神经网络。网络训练的核心本质就是为了通过调节权值和阈值让神经网络的误差达到最小,因此选取的适应度函数 $f(i)$ 如下。

$$f(i) = \sum_{i=1}^m (y'(i) - y(i))^2 \quad (16)$$

式中: m 为样本总数, $y'(i)$ 为第 i 个样本的实际训练输出值, $y(i)$ 为第 i 个样本的期望输出值。

3.2.5 改进自适应 CS-BP 算法流程

- 1) 确定网络结构;
- 2) 对 BP 神经网络的调整参数权值与阈值进行初始化;
- 3) 采用改进自适应 CS 算法对 BP 神经网络的权值与阈值进行编码;
- 4) 根据 (12) 式进行位置更新, 计算每个鸟巢的适应度函数值 f , 选择最优解;
- 5) 保留上代最优解, 同时根据改进自适应 CS 算法重新计算步长, 并依据 (12) 式对剩余鸟巢进行更新, 将新鸟巢与上一代最好的鸟巢作对比, 选择出适应度最好的鸟巢作为当前最好鸟巢;
- 6) 通过莱维飞行产生服从均匀分布的随机数 $r \in (0, 1)$, 并与 P_a 对比, 如 $r > P_a$ 则继续进行位置更新, $r < P_a$ 则保留上一代的最优解;

7) 对上一代最优解进行判断, 看其是否符合终止条件, 若符合, 则上一代的最优解为全局最优值, 若不符合, 返回第 5) 步继续进行迭代更新;

8) 将获得的最优解向量进行反编码操作, 提取所有 BP 神经网络的权值和阈值后建立 CS 优化 BP 神经网络的模型;

9) 应用样本数据训练 BP 神经网络, 当误差不再减小时, 训练结束, 并保存训练后的权值与阈值。

具体流程如图 9 所示。

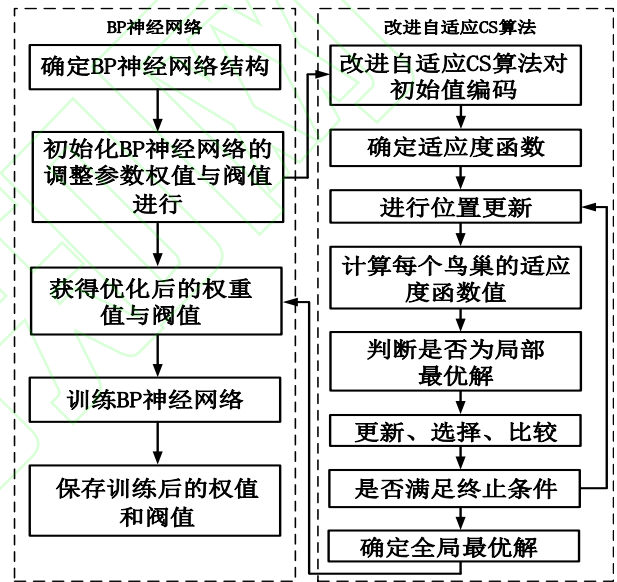
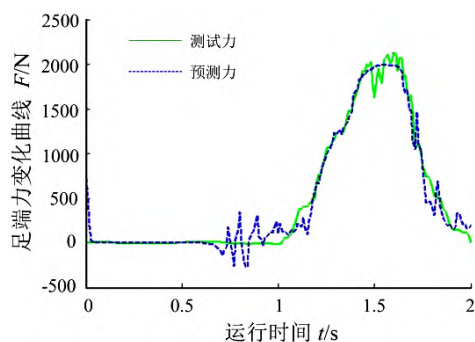


图 9 改进自适应 CS-BP 算法流程图

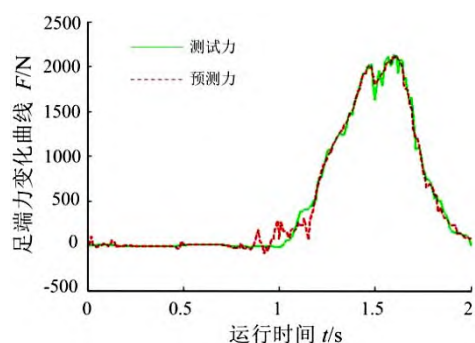
Fig. 9 Flow chart of improved adaptive CS-BP algorithm

4 仿真对比分析

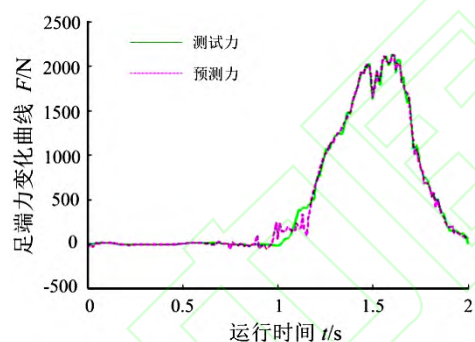
为验证改进自适应 CS-BP 算法的有效性, 利用 Matlab/2016a 软件编写程序, 同时对采用改进自适应 CS-BP 算法进行训练的预测数据与 BP、Fuzzy-BP 及 PSO-BP 所训练的预测数据做对比分析, 验证其可靠性。对比结果如图 10 所示。



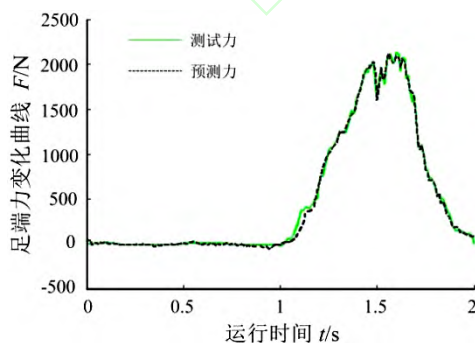
(a) BP 神经网络



(b) Fuzzy-BP 神经网络



(c) PSO-BP 算法



(d) 改进自适应 CS-BP 算法

图 10 仿真对比分析曲线

Fig. 10 Simulation comparison analysis curve

从图 10 (a) 中可以看出, 采用 BP 神经网络算法构建的液压四足机器人大小腿的液压伺服系统位移变化量与足端力变换模型, 其预测力与测试力之间存在明显的跟踪误差, 且在运行时间(步态周期)处于 1s (或者表示为 1/2 个步态周期时间)附近时, 出现力信号震荡; 从图 10 (b) 与图 10(c) 中可以看出采用 Fuzzy-BP 神经网络及 PSO-BP 算法, 其预测力与测试力之间的跟踪误差与 BP 神经网络相比明显减小, 但是在运行时间(步态周期)处于 1s 附近时, 依然存在震荡信号; 图 10 (d) 所示为采用改进自适应 CS-BP 算法, 其预测力能够很好的对测试力进行跟踪, 动态性能良好, 且在运行时间(步态周期)处于 1s 附近时, 没有震荡信号出现, 其预测力的输出结果良好, 能够满足液压四足机器人足端的末端位置期望力的跟踪动态性能要求。

5 试验分析

5.1 足端柔顺力测试

液压四足机器人在足端触地的瞬间, 足端位置变期望力跟踪的动态性能影响其腿部力柔顺性, 进而也影响其机身行走姿态的稳定性。因此, 为验证所提出的控制方法对提高液压四足机器人腿部力柔顺性能的可行性及采用改进自适应 CS-BP 算法预测跟踪期望力控制的有效性, 对“KL”液压四足机器人进行足端柔顺力测试。控制器的控制模型在图 4 的基础上进行优化设计如图 11 所示。

试验方式采用 Walk 步态在高刚度混凝土地质上做前进位移为 0 的抬腿运动; 同时, 为验证改进自适应 CS-BP 算法预测期望力控制方式的有效性, 采用与跟踪固定期望力、BP 预测期望力、Fuzzy-BP 预测期望力和 PSO-BP 预测期望力等控制方式进行对比分析; 在试验过程中, 液压四足机器人采用的抬腿/落地运动速度分别以步态周期为 0.5s、0.75s、1.0s、1.25s、1.5s、1.75s 及 2.0s

进行，测试其足端在触地瞬间时的力最大值（采集足端触地后 1/10 个步态周期时间的足端力数值，正常测试其值约为 100N；因为支撑相在超过 1/10

个步态周期时间时，采用算法构建的足端力跟踪性能将保持平稳）。试验结果如图 12 所示。

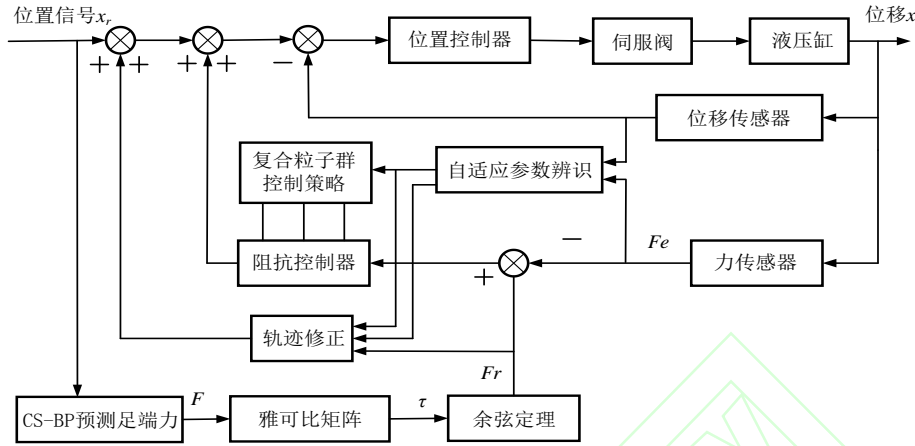


图 11 液压伺服系统控制框图

Fig. 11 Control block diagram of hydraulic servo system

从图 12 中可以看出，随着运动步态速度的不断提高，其足端在触地瞬间时的力最大值逐渐增大；同时，采用 BP、Fuzzy-BP、PSO-BP 及改进自适应 CS-BP 预测跟踪变期望力控制时的足端触地力明显小于固定跟踪固定期望力。试验结果验证了所提出的控制方法对提高液压四足机器人腿部力柔顺性的可行性。

其中，采用改进自适应 CS-BP 预测跟踪期望力控制时的足端力最大值在不同步态速度下均趋于 100N，与其它三种算法做预测跟踪变期望力的控制方式相比更稳定，其腿部力柔顺性明显的到了改善且测试效果要优于其它三种算法；试验结果验证了采用改进自适应 CS-BP 算法预测跟踪期望力控制的有效性，为液压四足机器人做刚性地面行走姿态平稳性测试提供了理论依据。

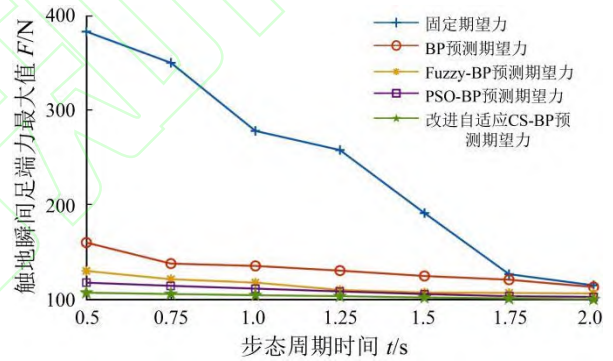


图 12 足端柔顺力测试图

Fig.12 Test drawing of foot flexural for force

5.2 刚性地面行走姿态平稳性测试

为验证上述理论对提高液压四足机器人在坚硬路面行走时的机身姿态平稳的有效性，根据仿真计算得到的结果，采用改进自适应 CS-BP 算法规划的足端跟踪变期望力轨迹。同时，采用跟踪固定期望力、PSO-BP 算法学习的跟踪变期望力与改进自适应 CS-BP 算法学习的跟踪变期望力进行 3 组对比分析测试；试验环境与 3.1.3 一致，试验过程如图 13 所示（在其腹部安装一个支架，支架底部距离地面 5cm，防止由于期望力

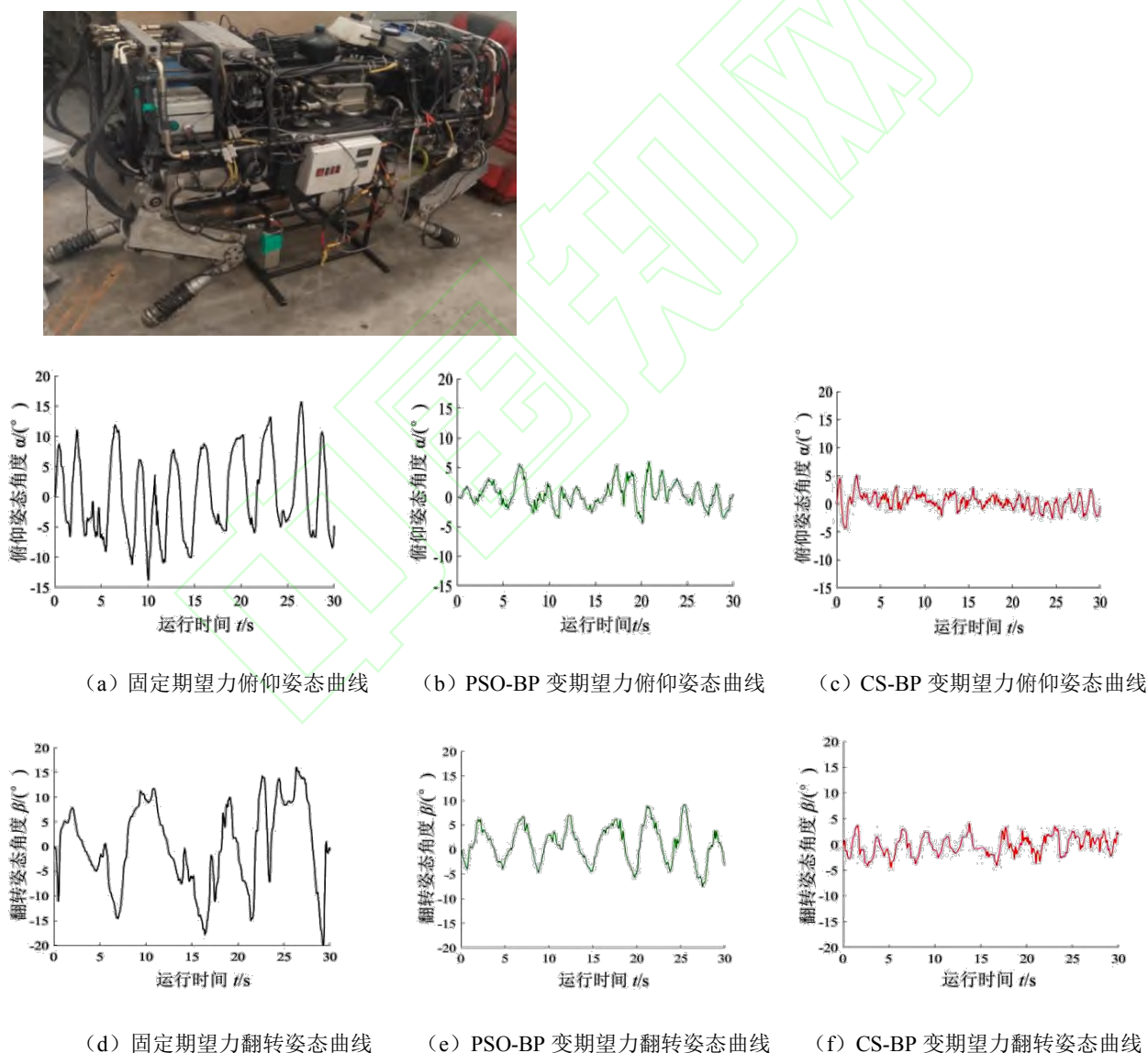
跟踪不稳时，使机器摔倒），选择 Trot 步态，步态周期为 2s，验证所提出的方法对“KL”液压四足机器人姿态行走的稳定性；实验结果如图 14 所示。

从图 14 (a) ~14 (c) 中可以看出，采用固定足端期望力（2000N），其机身俯仰姿态角度 $\alpha/(\circ)$ 在 $-13.5^{\circ} \sim 13.5^{\circ}$ 之间变化；采用 PSO-BP 算法学习的跟踪变期望力方式，其机身俯仰姿态角度 $\alpha/(\circ)$ 在 $-5^{\circ} \sim 5^{\circ}$ 之间变化；采用改进自适应 CS-BP 算法学习的跟踪变期望力方式，其机身俯仰姿态角度 $\alpha/(\circ)$ 在 $-2.5^{\circ} \sim 2.5^{\circ}$ 之间变化。

图 13 试验过程图片

Fig. 13 Photos of the test process

根据图 14 (d) ~图 14 (i) 所示，采用改进自适应 CS-BP 算法学习的跟踪变期望力方式，其机身翻转姿态角度 $\beta/(\circ)$ 在 $-4.5^{\circ} \sim 4.5^{\circ}$ 之间变化、机身航偏姿态角度 $\gamma/(\circ)$ 在 $-4^{\circ} \sim 4^{\circ}$ 之间变化，试验结果优于采用跟踪固定期望力方式和采用 PSO-BP 算法学习的跟踪变期望力方式，进而也验证了采用本文的控制方法，能够提高液压四足机器人在坚硬路面行走时的机身姿态稳定性。



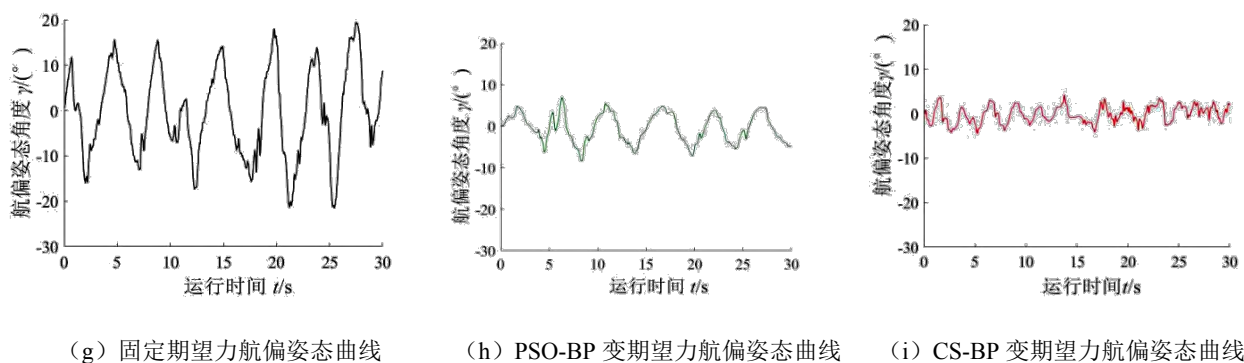


图 14 液压四足机器人行走姿态对比曲线

Fig. 14 Comparison curve of walking posture of hydraulic quadruped robot

6 结论

为解决液压四足机器人在坚硬路面行走时的足端与地面接触引起的刚性冲击,影响其机身行走姿态的平稳性问题,本文提出一种液压四足机器人足端变期望力跟踪方法,并通过物理样机试验验证所提出方法的有效性。研究所得到的结论如下:

(1) 本文采用一种改进自适应 CS-BP 算法建立了液压四足机器人躯干/小腿的液压伺服系统位移变化量与足端力之间的关系函数,保证了液压四足机器人足端在不同相位时的实时力跟踪控制需求;

(2) 借助 Matlab2016a 软件将改进自适应 CS-BP 算法与 BP、Fuzzy-BP 及 PSO-BP 算法所训练的预测数据进行仿真对比分析,验证其足端预测力对测试力的跟踪效果优于其它三种算法,满足了液压四足机器人末端位置期望力的跟踪动态性能要求;

(3) 通过“KL”试验样机进行足端柔顺力控制测试,验证了采用改进自适应 CS-BP 算法控制足端位置期望力的跟踪性能优于固定期望力及 BP 算法、Fuzzy-BP 算法及 PSO-BP 算法,能够有效缓解足端与地面接触时的刚性冲击,提高腿部力柔顺性能。

(4) 通过“KL”试验样机进行刚性地面行走

姿态平稳性测试,验证了在跟踪足端期望力控制时,采用改进自适应 CS-BP 算法的性能优于固定期望力及 PSO-BP 算法,其机身姿态俯仰、翻转、航偏角度大幅度减小,提高了液压四足机器人在坚硬路面行走时的机身姿态稳定性。

本文的研究工作为液压四足机器人的机身姿态平稳性控制方面的相关研究提供了参考。

参考文献:

- [1] 余联庆,王玉金,王立平,等.基于机体翻转的四足机器人翻越台阶过程的运动学分析[J]. 中国机械工程, 2012, 23(5): 518-524.
- Yu Liangqing, Wang Yujin, Wang Liping, et al. Kinematics Analysis of Quadruped Robot Climbing Step Based on Body Flipping[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(5): 518-524.
- [2] 汪红波,余联庆,王玉金,等.具有翻滚模式的可变形四足机器人结构设计与分析[J]. 中国机械工程, 2012, 23(22): 2743-2747.
- Wang Hongbo, Yu Lianqing, Wang Yujin, et al. Design and Analysis of a Transformable Quadruped with Rolling Mode[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(22): 2743-2747.
- [3] 雷静桃,俞煌颖,王峰.四足机器人对角小跑步态动态稳定步行足端非连续约束及动力学建模[J]. 中国机

- 械工程, 2015, 26(5): 592-597.
- Lei Jingtao, Yu Huangying, Wang Feng. Analysis on Non-continuous Constraints and Dynamics Modeling of Quadruped Robot Dynamically Stable Walking with Trot Gait[J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(5): 592-597.
- [4] Vidoni R, Gasparetto A. Efficient Force Distribution and Led Posture for a Bio-inspired Spider Robot[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2011, 59(2): 142-150.
- [5] 李鑫. 基于虚拟模型和阻抗控制的四足液压驱动机器人行走研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- Li Xin Research on Walking of Hydraulically Driven Quadruped Robot Based on Virtual Model and Impedance Control[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [6] 张国腾. 四足机器人主动柔顺及对角小跑步态运动控制研究[D]. 济南: 山东大学, 2016.
- Zhang Guoteng. Research on Active Compliance and Trotting Gait Control of a Quadruped Robot[D]. Jinan: Shandong University, 2016.
- [7] 丁庆鹏. 基于阻抗控制的四足仿生机器人稳定步态理论及实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- Ding Qingpeng. Theory and Experimental Research on Stable Gait of Quadruped Robot Based on Impedance Control[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [8] 李冰. 农业足式移动平台运动姿态平稳性控制方法及试验研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2018.
- Li Bing. The Control Strategy and Experimental Study of The Motion Stationarity of The Agricultural Foot Mobile Platform[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2018.
- [9] 俞滨, 巴凯先, 王佩, 等. 四足机器人液压驱动单元变刚度和变阻尼负载特性的模拟方法[J]. 中国机械工程, 2016, 27(18): 2458-2466.
- Yu Bin, Ba Kaixian, Wang Pei, et al. Simulation Method of Variable Stiffness and Damping Load Characteristics on Hydraulic Drive Unit of a Quadruped Robot[J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(18): 2458-2466.
- [10] 柯贤锋, 王军政, 何玉东, 等. 基于力反馈的液压足式机器人主/被动柔顺性控制[J]. 机械工程学报, 2017, 53(1): 13-20.
- Ke Xianfeng, Wang Junzheng, He Yudong, et al. Active/Passive Compliance Control for a Hydraulic Quadruped Robot Based on Force Feedback[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(1): 13-20.
- [11] 邵璇, 张永德, 孙桂涛, 等. 液压四足机器人内力抑制及实验研究[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(9): 73-81.
- Shao Xuan, Zhang Yongde, Sun Guitao, et al. Inner force inhibit and experiment research of hydraulic quadruped robot[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(9): 73-81.
- [12] 柴汇. 液压驱动四足机器人柔顺及力控制方法的研究与实现[D]. 济南: 山东大学, 2016.
- Chai Hui. Research and Implementation on Compliance and Force Control of Hydraulically Actuated Quadruped Robot[D]. Jinan: Shandong University, 2016.
- [13] 邵璇. 液压四足机器人力平衡控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2018.
- Shao Xuan. Research on Force Balance Control of Hydraulic Quadruped Robot[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2018.

- [14] Xiuli Z, Haojun Z, Xu G, et al. A biological inspired quadruped robot: structure and control[C]. IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2005. HongKong: IEEE Proceedings, 2005: 387-392.
- [15] Meek S, Kim J, Anderson M. Stability of a trotting quadruped robot with passive, underactuated legs[C]. ICRA 2008. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2008. Pasadena: IEEE Proceedings, 2008: 347-351.
- [16] 李满天,蒋振宇,郭伟,等.四足仿生机器人单腿系统[J]. 机器人, 2014, 36(1): 21-28.
- Li Mantian, Jiang Zhanyu, Guo Wei, et al. Leg Prototype of a Bio-inspired Quadruped Robot[J]. 2014, 36(1): 21-28.
- [17] 常青,韩宝玲,罗庆生. 四足机器人改进型对角小跑步态研究[J]. 中国机械工程, 2015, 26(18): 2426-2431.
- [18] 苏文海,李冰,袁立鹏,等.立体坡面农业四足移动平台姿态控制策略与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(4): 80-91.
- Su Wenhai, Li Bing, Yuan Lipeng, et al. Strategy and experiment of attitude control for quadruped mobile platform walking on three-dimensional slope used for agriculture[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(4): 80-91.
- [19] 谢惠祥,尚建忠,罗自荣,等.四足机器人对角小跑中机体翻转分析与姿态控制[J]. 机器人 2014, 36(6): 676-682.
- Xie Huixiang, Shang Jianzhong, Luo Zirong, et al. Body Rolling Analysis and Attitude Control of a Quadruped Robot during Trotting[J]. Robot, 2014, 36(6): 676-682.
- [20] 苏文海,李冰,闫聪杰,等. 基于复合粒子群自适应液压伺服系统力跟踪控制与试验[J]. 东北农业大学学报, 2018, 49(1): 85-96.
- Su Wenhai, Li Bing, Yan Congjie, et al. Force tracking control and test of adaptive hydraulic servo system based on composite particle swarm optimization[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2018, 49(1): 85-96.
- [21] 纪华伟,刘毛娜,胡小平. 基于混合遗传算法的磁控形状记忆合金驱动器磁滞模型优化[J]. 中国机械工程, 2015, 26(4): 508-512.
- Ji Weihua, Liu Maona, Hu Xiaoping. Optimization of MSMA Actuator Hysteresis Model Based on Hybrid GA[J]. China Mechanical Engineering, 2015. 26(4): 508-512.
- [22] 陈永亮,彭涛,刘德帅,等.面向现场加工的全液压驱动主轴水下钻孔特性建模与优化方法[J]. 中国机械工程, 2018, 29(4): 471-476.
- Chen Yongliang, Peng Tao, Liu Deshuai, et al. Characteristic Modeling and Optimization Method of Underwater Hydraulic Spindle Drilling Processes for In-situ Machining Systems[J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(4): 471-476.
- [23] 李光,符浩.无模型机械臂 BP 神经网络状态观测及反演跟踪控制[J]. 中国机械工程, 2016, 27(7): 859-865.
- Li Guang, Fu Hao. BP Neural State Observation and Backstepping Tracking Control of Model-free Robotic Manipulators[J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(7): 859-865.
- [24] 刘大玲,黄小钢.高速铁路无砟轨道系统状态监测及预防性维修[J]. 中国机械工程, 2019, 30(3): 349-353.
- Liu Daling, Huang Xiaogang. Condition Monitoring and Preventive Maintenance of Ballastless Track Systems for High-speed Railways[J]. China

- Mechanical Engineering, 2019, 30(3): 349-353.
- [25] 李扬,吴敏渊,邹炼.基于布谷鸟算法的BP神经网络图像复原[J]. 计算机应用, 2017, 37(S1): 173-175+197.
- Li Yang, Wu Minyuan, Zou Lian. BP neural network for image restoration based on cuckoo algorithm[J]. Journal of Computer Applications, 2017, 37(S1): 173-175+197.
- [26] 叶文,李翔晟,单外平. 基于改进布谷鸟搜索优化神经网络的AMT换挡电机控制[J]. 计算机应用, 2018, 38(S2): 67-71.
- Ye Wen, Li Xiangsheng, Shan Waiping. Control of AMT shift motor based on improved CS algorithm to optimize neural network[J]. Journal of Computer Applications, 2018, 38(S2): 67-71.
- [27] 周瑞红. 基于群智能优化理论的聚类改进方法及应用研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- Zhou Ruihong. Improved Clustering Methods Based on Swarm Intelligence Theories and Their Applications[D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [28] Jie-Sheng W, Shuang H, Na-Na S, et al. Features Extraction of Flotation Froth Images and BP Neural Network Soft-Sensor Model of Concentrate Grade Optimized by Shuffled Cuckoo Searching Algorithm[J]. The Scientific World Journal, 2014, 2014:1-17.
- [29] Nawi N M, Khan A, Rehman M Z. A New Back-Propagation Neural Network Optimized with Cuckoo Search Algorithm[C]//Proceedings of the 13th international conference on Computational Science and Its Applications - Volume 1. Springer Berlin Heidelberg, 2013, 413-426.
- [30] Chen J F, Do Q H. Forecasting Daily Electricity Load by Wavelet Neural Networks Optimized by Cuckoo Search Algorithm[C]// 2017 6th IIAI International Congress on Advanced Applied Informatics (IIAI-AAI). IEEE Computer Society, 2017, 835-840.
- [31] Manickavasagam R, Selvan S. Automatic Detection and Classification of Lung Nodules in CT Image Using Optimized Neuro Fuzzy Classifier with Cuckoo Search Algorithm[J]. Journal of Medical Systems, 2019, 43(3): 77-86.
- [32] 贾涵,连晓峰.发现概率参数自适应调节的布谷鸟改进算法[J]. 计算机工程与应用, 2018, 54(22): 16-22.
- Jia Han, Lian Xiaofeng. Improved cuckoo algorithm for adaptive adjustment of discovery probability parameter[J]. Computer Engineering and Applications, 2018, 54(22): 16-22.

作者简介:

李冰,男,1988年生,博士研究生。

主要研究方向为: 电液伺服特性及医疗机器人。

E-mail:1810100011@stu.hrbust.edu.cn。

张永德(通信作者),男,1965年生,教授、博士研究生导师。

主要研究方向为: 医疗机器人、教育机器人、服务机器人、仿生机器人、液压伺服智能机器人。

E-mail:zhangyd@hrbust.edu.cn。