

# 液压驱动单元基于力的阻抗控制方法控制参数灵敏度分析

俞 滨<sup>1,2,3</sup>, 巴凯先<sup>1,3†</sup>, 刘雅梁<sup>1,3</sup>, 王东坤<sup>1,3</sup>, 马国梁<sup>1,3</sup>, 孔祥东<sup>1,2,3</sup>

(1. 燕山大学 机械工程学院, 河北 秦皇岛 066004; 2. 南京工程学院 机械工程学院, 南京 211167;  
3. 河北省重型机械流体动力传输与控制实验室, 河北 秦皇岛 066004)

**摘 要:** 液压驱动型高性能足式仿生机器人具有很好的适应能力, 为尽可能地避免其足地接触过程中的冲击和碰撞, 足式机器人的关节应具有一定的柔顺性, 而基于力的阻抗控制是一种在液压驱动型高性能足式仿生机器人腿部关节中常用的主动柔顺控制方法. 针对驱动足式机器人关节运动的液压驱动单元 (HDU), 研究基于力的阻抗控制方法在 HDU 上的应用, 推导其状态空间表达, 并在 HDU 性能测试平台上对阻抗控制效果进行实验验证. 针对影响阻抗控制效果的 4 个主要控制参数, 对比分析不同灵敏度分析方法的优劣势, 最终确定使用相对简单求解过程的一阶矩阵灵敏度分析方法, 对 4 个参数在 4 种不同工况下进行动态灵敏度分析以及定量灵敏度分析, 并进行实验验证. 所得基于力的阻抗控制参数灵敏度分析结论可作为不同工况下控制参数优化的理论参考和实验基础.

**关键词:** 足式仿生机器人; 液压驱动单元; 柔顺性; 基于力的阻抗控制; 矩阵灵敏度; 控制参数

中图分类号: TP173

文献标志码: A

## Control parameters sensitivity analysis of force-based impedance control for hydraulic drive unit

YU Bin<sup>1,2,3</sup>, BA Kai-xian<sup>1,3†</sup>, LIU Ya-liang<sup>1,3</sup>, WANG Dong-kun<sup>1,3</sup>, MA Guo-liang<sup>1,3</sup>, KONG Xiang-dong<sup>1,2,3</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China; 2. School of Mechanical Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China; 3. Hebei Provincial Key Laboratory of Heavy Machinery Fluid Power Transmission and Control, Qinhuangdao 066004, China)

**Abstract:** The bionic legged robot, driven by hydraulic, has a better ability to operate in different working environment. In order to prevent the robotic foot end from impact and collision during its contact with the ground, it is necessary to design the robotic joint with certain dynamic compliance. Generally speaking, the force based impedance control is a commonly adopted method for active dynamic compliance control in the legged robot's joints. Aiming at the joint driver of legged robot, which is called hydraulic drive unit (HDU), the application of the force-based impedance control method on the HDU is researched. The state space expressions are also developed. The control effect of the impedance control is tested experimentally on the HDU performance test platform. Then, aiming at the main four control parameters, the easier first order matrix sensitivity analysis method is selected according to the advantages and disadvantages of different sensitivity analysis methods. Particularly, the dynamic sensitivity analysis and quantitative sensitivity analysis are conducted for those four parameters under multiple working conditions. Finally, the test experiments are conducted. It is found that the experimental results obtained can be applied under different working conditions. Based on the control performance requirement, the values of control parameters can be compensated specifically and the control strategy can be well optimized.

**Keywords:** the bionic legged robot; hydraulic drive unit; dynamic compliance; force-based impedance control; matrix sensitivity analysis; control parameters

## 0 引 言

足式机器人相对于轮式和履带式机器人, 对未知、非结构环境具有很好的适应能力, 能够跨越障碍,

特别适用于野外复杂环境下的探测、运输、救援、军事辅助等任务, 是各国机器人研究人员的研究热点. 而液压驱动相对于传统的电机驱动和气压驱动, 具有

收稿日期: 2018-01-16; 修回日期: 2018-06-05.

基金项目: 中国博士后科学基金项目 (2018M640246); 河北省研究生创新项目 (CXZZSS2019037); 国家自然科学基金青年科学基金项目 (51605417).

责任编辑: 张文安.

†通讯作者. E-mail: bkg@ysu.edu.cn.

体积小、输出功率大、响应快、精度高等优势,可满足高性能足式机器人的控制需求,因此,近年来在足式机器人领域中备受重视<sup>[1-4]</sup>.

鉴于液压马达的结构尺寸限制和低速爬行等问题,液压驱动型的足式机器人通常以阀控液压缸结构作为每个主动运动关节的驱动器,这种结构称之为液压驱动单元(HDU)<sup>[5-6]</sup>.系统的阻抗控制相关研究在足式机器人控制领域有着较为广泛的应用,其控制目的是使机器人足端在接触地面等刚度较大的负载时,可以具备一定的柔顺性,从而保证机器人整机不受破坏,并保证机器人的整体运动控制性能.这种阻抗控制方法是将系统等效为具有理想的刚度和阻尼的二阶质量-弹簧-阻尼系统,该方法已广泛应用于电机驱动的足式机器人领域中,比如Tekken<sup>[7]</sup>、Scout<sup>[8]</sup>、KOLT<sup>[9]</sup>、MIT cheetah robot<sup>[10]</sup>、LittleDog<sup>[11]</sup>等.近年来,液压驱动的足式机器人,比如Bigdog<sup>[12]</sup>、HyQ<sup>[13]</sup>、Scalf-1<sup>[14]</sup>、LWR<sup>[15]</sup>、StarlETH<sup>[16]</sup>等也广泛使用这种阻抗控制方法,这其中基于力控制内环的阻抗控制方法最为常用.由于液压系统具有较多的结构参数、工作参数和控制参数,这些参数当中大部分都会随着工况的不同而发生突变,再与液压系统的固有非线性、强耦合性结合,所得控制效果往往不能达到预期.在这种情况下,需要掌握一些重要控制参数变化对阻抗控制性能产生的影响,针对影响较大的参数重点优化并补偿控制,针对影响较小的参数在控制中可忽略其突变特性.

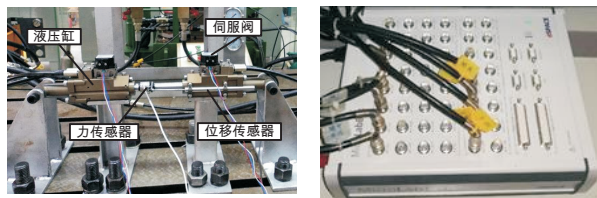
灵敏度分析是一种可以分析系统各参数变化对系统特性影响程度大小的有效方法,特别是对于非线性系统同样适用.灵敏度分析方法很多:从数学计算方法上可分为:轨迹灵敏度法、输出灵敏度法、矩阵灵敏度法、比较灵敏度法和特征根灵敏度法等;从求解精度上可分为:一阶灵敏度法、二阶灵敏度法等.这些灵敏度计算方法具有不同的数学计算特点,因此从计算精度、计算方式和计算繁琐程度等方面均不尽相同,使得上述灵敏度方法各具优势和适用范围.近年来,诸多学者已在不同领域广泛应用了灵敏度分析法,而在液压系统的应用中,灵敏度分析应用相对较少.Vilenus<sup>[17]</sup>首次将一阶轨迹灵敏度分析应用在液压系统中,以伐木机械的伺服阀控缸位置控制系统为研究对象,在单一工况下,给出了该系统存在的10个主要参数在变化1%时的灵敏度;Farasat等<sup>[18]</sup>搭建了伺服阀控缸位置控制系统的四阶线性数学模型,模型中将伺服阀压力-流量非线性进行了局部线性化,在文献[17]的10个参数的基础上,还给出

了其他7个参数的一阶轨迹灵敏度分析结果,并使用4种灵敏度评价方法,在某单一工况下,量化各参数在变化1%时对系统各状态变量的灵敏度;Kong等<sup>[19]</sup>搭建了四足机器人HDU上五阶线性位置控制模型,使用一阶轨迹灵敏度研究了其中涉及的14个参数在变化1%时对系统输出的影响程度,在文献[17-18]的基础上,在单一工况下,研究了PID控制参数对位置控制性能的影响程度;Kong等<sup>[19-20]</sup>在一阶轨迹灵敏度的基础上,推导出了二阶轨迹灵敏度分析方法,并研究了四足机器人HDU位置控制系统上14个参数在变化1%~20%时对系统输出的影响程度,并实验验证了分析结论.

上述研究成果(并不限于文中引用),使用了一阶或二阶轨迹灵敏度分析,针对液压阀控缸位置控制系统,研究了各参数对控制特性的影响程度.但上述文献中都只针对液压阀控缸位置控制系统进行了研究,并未针对机器人液压单元使用阻抗控制方法进行分析.同时,所使用的轨迹灵敏度分析方法(尤其是二阶轨迹灵敏度分析方法)的求解过程十分困难且繁琐.针对上述两个问题,本文首先基于HDU力控系统数学模型,推导基于力的阻抗控制方法在液压系统中的实现方法,并实验研究该控制方法的控制性能;然后,针对该控制方法中4个主要控制参数进行灵敏度分析,主要针对轨迹灵敏度分析方法求解困难且繁琐的问题,推导出求解过程相对简单的矩阵灵敏度分析方法,作为本文的灵敏度分析方法,把所得矩阵灵敏度分析结果与轨迹灵敏度分析结果进行对比,得出最适宜的灵敏度分析方法;最后,给出基于力的阻抗控制方法中4个主要控制参数对控制性能的动态灵敏度分析和定量灵敏度分析结果,并进行实验验证.

## 1 HDU及其性能测试平台简介

HDU是一种高集成性阀控对称缸结构,是足式机器人腿部关节驱动器.HDU性能测试实验平台实物照片如图1(a)所示,该实验平台采用了航空航天、船舶、工程机械等诸多领域广泛应用的电力模拟原理,由两套相同的HDU对顶安装.在进行本文的HDU基于力的阻抗控制实验时,左侧HDU在力闭环控制基础上加入阻抗控制外环,称为待测系统;右侧HDU做位置闭环控制,用于模拟位置干扰,称为位置加载系统;位置加载系统与待测系统之间通过力传感器刚性连接.HDU性能测试实验平台所使用的控制器采用半实物仿真平台dSPACE,其实物如图1(b)所示.



(a) 液压驱动单元性能测试平台 (b) dSPACE实物

图1 HDU性能测试实验系统

## 2 HDU基于力的阻抗控制

### 2.1 基于力的阻抗控制状态空间表达

阻抗控制实际上是一种主动二阶柔顺控制,其目的就是使系统具有期望阻抗特性,而阻抗特性就是想让系统具有期望刚度、期望阻尼以及期望质量.该控制方法传递框图如图2所示.

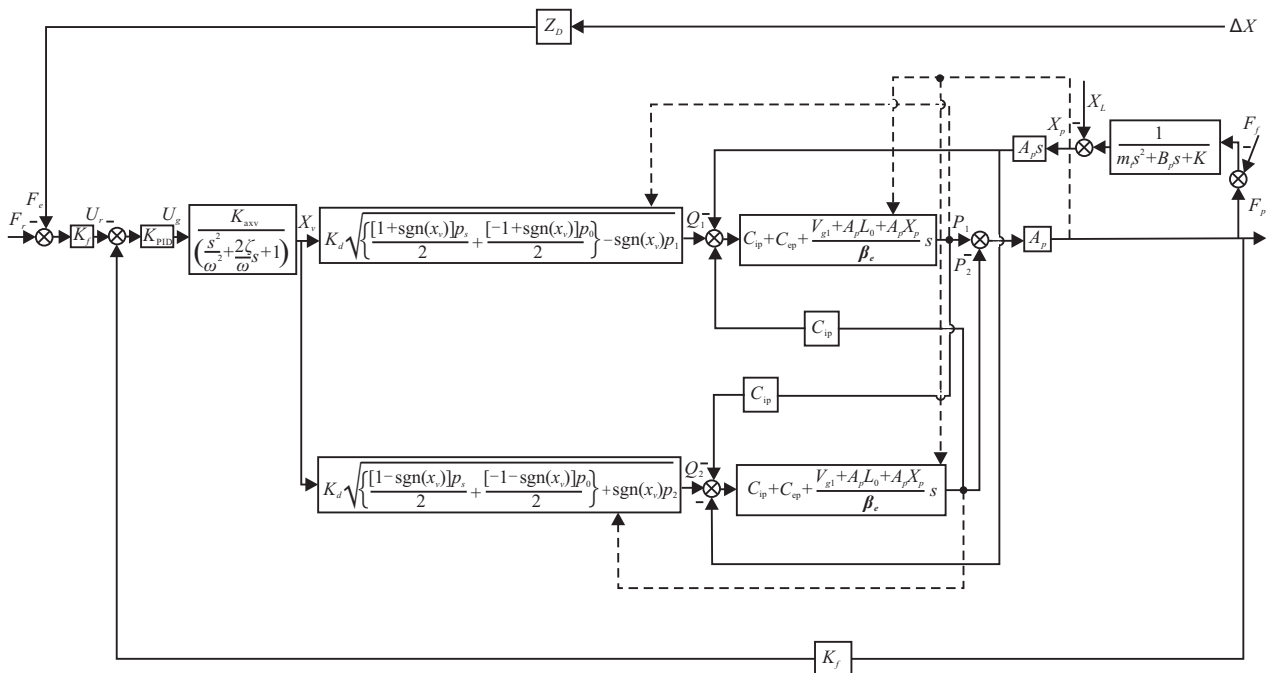


图2 HDU基于力的阻抗控制传递框图

HDU力控制内环传递框图具体推导过程与基于力的阻抗控制实现方法见文献[1].在图2中: $F_r$ 为输入力; $F_e$ 为阻抗期望力; $K_f$ 为力传感器增益; $U_r$ 为输入电压; $K_{PID}$ 为PID控制器增益,包含有比例增益 $K_P$ 、积分增益 $K_I$ 和微分增益 $K_D$ ; $U_g$ 为控制器输出电压; $K_{axv}$ 为伺服阀增益; $s$ 为拉氏算子; $\zeta$ 为伺服阀阻尼比; $\omega$ 为伺服阀固有频率; $X_v$ 为伺服阀阀芯位移; $K_d = C_d W \sqrt{2/\rho}$ ( $K_d$ 为折算系数),其中 $C_d$ 为伺服阀滑阀节流口流量系数, $W$ 为滑阀面积梯度, $\rho$ 为液压油密度; $p_s$ 为系统供油压力; $p_0$ 为系统回油压力; $p_1$ 为伺服缸左腔压力; $p_2$ 为伺服缸右腔压力; $Q_1$ 为伺服阀进油流量; $Q_2$ 为伺服阀回油流量; $C_{ip}$ 为伺服阀内泄漏系数; $C_{ep}$ 为伺服阀外泄漏系数; $V_{g1}$ 为伺服阀与伺服缸进油连接管道容积; $V_{g2}$ 为伺服阀与伺服缸回油连接管道容积; $A_p$ 为伺服缸活塞有效面积; $L_0$ 为伺服缸活塞初始位置, $L$ 为伺服缸活塞总行程; $\beta_e$ 为油液有效体积弹性模量; $X_P$ 为伺服缸活塞位移; $A_p$ 为伺服缸活塞有效面积; $X_L$ 为负载位置; $m_t$ 为负载质量; $B_p$ 为负载阻尼; $K$ 为负载刚度; $F_f$ 为摩

擦力; $F_p$ 为输出力; $Z_D$ 为阻抗特性参数,其中 $Z_D = C_D s + E_D$ , $C_D$ 为阻抗特性参数中的期望阻尼, $E_D$ 为阻抗特性参数中的期望刚度; $\Delta X$ 为干扰位置.

图2中状态变量为

$$\begin{aligned} x_1 &= x_p, \quad x_2 = \dot{x}_p, \quad x_3 = x_v, \\ x_4 &= \dot{x}_v + a_1 C_D K_P u_2, \\ x_5 &= \ddot{x}_v - a_1 K_P u_1 + a_1 C_D K_P \dot{u}_2 - \\ &\quad a_1 (2\zeta \omega C_D K_P - C_D K_I - E_D K_P) u_1, \\ x_6 &= p_1, \quad x_7 = p_2. \end{aligned}$$

其中输入量为

$$u_1 = F_r, \quad u_2 = X_L.$$

干扰输入量为

$$w_1 = X_L, \quad w_2 = \dot{X}_L, \quad w_3 = \ddot{X}_L.$$

相应的状态空间表达式为

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + B\mu + B_w w, \\ y = Cx. \end{cases} \quad (1)$$

设 $a_1 = \omega^2 K_f K_{axv}$ ,则式(1)中各矩阵可表示为

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{K}{m_t} & -\frac{B_p}{m_t} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & a_1 K_P \beta_e \left( \frac{A_1^2}{V_1} + \frac{A_2^2}{V_2} \right) & -a_1 K_P \beta_e \left( \frac{A_1 K_1}{V_1} + \frac{A_2 K_2}{V_2} \right) & -\omega^2 & -2\zeta\omega \\ 0 & -\frac{\beta_e A_1}{V_1} & \frac{\beta_e K_1}{V_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\beta_e A_2}{V_2} & -\frac{\beta_e K_2}{V_2} & 0 & 0 \end{bmatrix} \rightarrow$$

$$\leftarrow a_1 \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{A_1}{m_t} & -\frac{A_2}{m_t} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ a_1 \left( \frac{A_1 K_P \beta_e C_{ip}}{V_1} + \frac{A_2 K_P \beta_e C_{ip}}{V_2} - A_1 K_I \right) & a_1 \left( A_2 K_I - \frac{A_1 K_P \beta_e C_{ip}}{V_1} - \frac{A_2 K_P \beta_e C_{ip}}{V_2} \right) \\ -\frac{\beta_e C_{ip}}{V_1} & \frac{\beta_e C_{ip}}{V_1} \\ \frac{\beta_e C_{ip}}{V_2} & -\frac{\beta_e C_{ip}}{V_2} \end{bmatrix} \quad ,$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -a_1 C_D K_P \\ a_1 K_P & a_1 (2\zeta\omega C_D K_P - C_D K_I - E_D K_P) \\ a_1 (K_I - 2\zeta\omega K_P) & a_1 [E_D K_I + 2\zeta\omega (2\zeta\omega C_D K_P - C_D K_I - E_D K_P) - \omega^2 C_D K_P] \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad ,$$

$$B_w = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \frac{K}{m_t} & \frac{B_p}{m_t} & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{7 \times 3} \quad , \quad C = [0, 0, 0, 0, 0, A_p, -A_p].$$

2.2 基于力的阻抗控制实验研究

本文以力正弦响应为输入信号分析HDU基于力的阻抗控制效果以及其主要控制参数的灵敏度. 为研究在不同工况下阻抗控制效果以及控制参数的灵敏度变化规律, 本文选定4种工况条件, 如表1所示.

表1 实验方案

工况序号	工况条件	
	频率/Hz	偏移量, 幅值/mm
1	1	1.5, 1
2	2	1.5, 1
3	1	2.5, 2
4	2	2.5, 2

本文设定某一机器人腿部关节期望刚度  $E_D = 1 \times 10^6$ ,  $C_D = 5000$ ,  $M_D = 0$ . 由于基于力的阻抗控制的外干扰是负载位置, 本文在做仿真研究和实验测试时, 由位置控制系统模拟待测系统所受负载位置. 仿真和实验中期望位置为待测系统实际所受负载位置(即位置控制系统输出位置, 实验时为位移传感器实测数值), 而实际位置为待测系统输出力与期望阻抗特性  $Z_D$  的比值(实验时为力传感器实测数值/ $Z_D$ ), 实验中采用的阻抗控制方法为作者前期研究成果<sup>[1]</sup>. 所研究工况阻抗控制正弦响应实验与仿真对比曲线如图3~图6所示, 其中虚线为实际位置, 实线为期望位置.

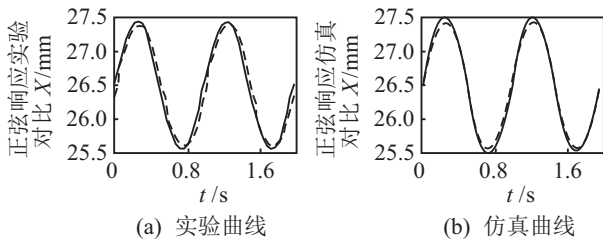


图3 正弦响应实验仿真对比 (1 Hz 频率, 1.5 mm 偏移量, 1 mm 幅值)

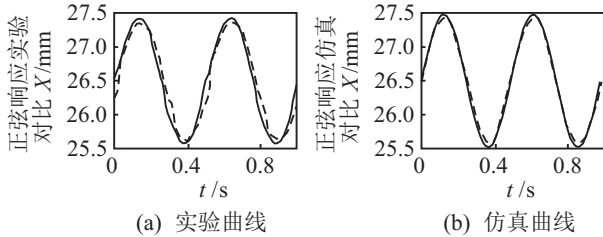


图4 正弦响应实验仿真对比 (2 Hz 频率, 1.5 mm 偏移量, 1 mm 幅值)

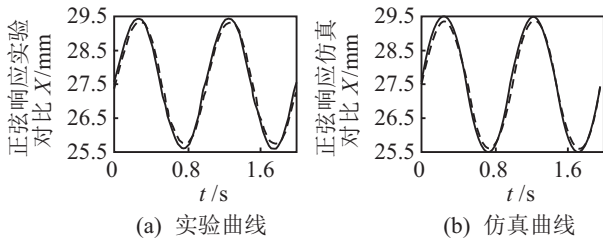


图5 正弦响应实验仿真对比 (1 Hz 频率, 2.5 mm 偏移量, 2 mm 幅值)

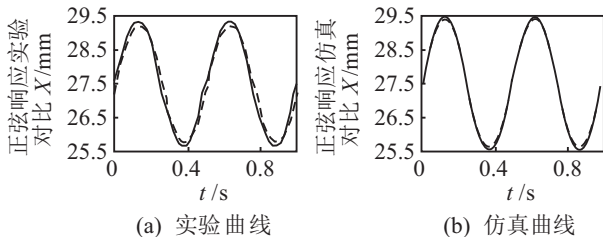


图6 正弦响应实验仿真对比 (2 Hz 频率, 2.5 mm 偏移量, 2 mm 幅值)

幅值衰减和相角滞后是评价正弦响应的两项重要性能指标,各工况下幅值衰减最大值与相角滞后平均值如表2所示,其中幅值衰减精确到10 μm,相角滞后精确到0.1°。

表2 各工况下两项性能指标平均值

性能指标	工况序号				
	1	2	3	4	
幅值衰减/mm	实验值	-0.03	-0.07	-0.04	-0.08
	仿真值	-0.03	-0.06	-0.03	-0.06
相角滞后/(°)	实验值	4.3	3.3	6.1	5.9
	仿真值	2.6	2.5	2.8	2.1

由表2可以看出,正弦响应两项性能指标在实验和仿真中相差不大,说明仿真与实验曲线拟合度较好。可以看出,阻抗控制实际位移值小于期望位移值,故幅值衰减均为正值,其中幅值衰减量随着干扰力幅值的增加而增加,与干扰力频率关系不大,相角滞后

量随着干扰力频率的增加而增加,与干扰力幅值关系不大。

### 3 灵敏度分析方法选取

#### 3.1 一、二阶灵敏度分析结果对比

期望刚度  $E_D$  和期望阻尼  $C_D$  作为阻抗控制外环控制参数,比例增益  $K_P$  和积分增益  $K_I$  作为力控制系统内环控制参数,它们都会对阻抗控制效果产生不同影响,故本文重点研究这4个控制参数在发生变化时对阻抗控制实际位置产生的影响。由于篇幅所限,选取其中一种工况(频率2 Hz,偏移量1.5 mm,幅值1 mm)为研究对象,采用作者前期研究的一阶、二阶轨迹灵敏度分析法<sup>[16]</sup>,分析这4个参数增加10%时所引起的位移变化,其对比曲线如图7所示,其中虚线为二阶变化,实线为一阶变化。

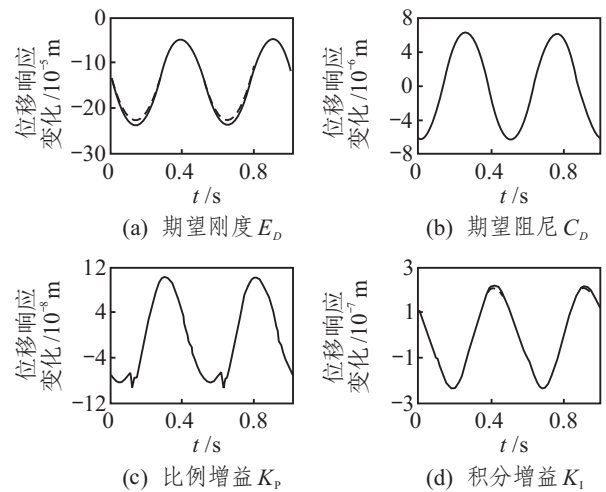


图7 各参数增加10%时的位移响应变化

由上述4组曲线可以看出,4个控制参数在增加10%时,其对位移产生的一阶变化与二阶变化相差很小,其中期望阻尼  $C_D$  和比例增益  $K_P$  的一、二阶对比曲线几乎重合,其余两个控制参数偏差最大值也不超过总振幅的10%。

二阶轨迹灵敏度分析虽具有极高的精度,但其求解过程十分繁琐,计算工作量非常大,尤其本文研究的4个控制参数在增加10%之内一、二阶灵敏度分析结果差距较小,为保证计算简便性和实际应用性,本文应用一阶灵敏度分析4个控制参数在各工况下的灵敏度结果。

#### 3.2 一阶矩阵灵敏度理论推导

HDU 基于力的阻抗控制系统方程可表示为

$$g(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \boldsymbol{\alpha}, t) = 0. \quad (2)$$

其中:  $\mathbf{x}$  为  $m$  维状态变量,  $\mathbf{u}$  为与  $\boldsymbol{\alpha}$  无关的  $r$  维输入矢量,  $\boldsymbol{\alpha}$  为  $p$  维参数矢量,  $t$  为时间。



在参数矢量初值  $\alpha_0$  一定的情况下, 给定输入信号初值  $u_0$ , 可以得到状态变量的初值  $x_0$ , 则方程组(2)的初始值为

$$g(x_0, u_0, \alpha_0, t) = 0. \quad (3)$$

参数矢量  $\alpha$  的变化  $\Delta\alpha$  和输入矢量  $u$  的变化  $\Delta u$  会引起状态变量  $x$  的变化  $\Delta x$ , 即

$$g(x_0 + \Delta x, u_0 + \Delta u, \alpha_0 + \Delta\alpha, t) = 0. \quad (4)$$

上式进行一阶泰勒展开, 可化为

$$\begin{aligned} g(x_0 + \Delta x, u_0 + \Delta u, \alpha_0 + \Delta\alpha, t) \approx \\ g(x_0, u_0, \alpha_0, t) + g_x \cdot \Delta x + g_u \cdot \Delta u + g_\alpha \cdot \Delta\alpha. \end{aligned} \quad (5)$$

将式(3)代入(5), 忽略高阶项, 可得

$$g_x \cdot \Delta x + g_u \cdot \Delta u + g_\alpha \cdot \Delta\alpha = 0. \quad (6)$$

上式可化为

$$\Delta x = -g_x^{-1} \cdot g_u \cdot \Delta u - g_x^{-1} \cdot g_\alpha \cdot \Delta\alpha. \quad (7)$$

在式(7)中, 设

$$S_u = g_x^{-1} \cdot g_u. \quad (8)$$

其中:  $S_u$  为  $m \times r$  阶矩阵, 其第  $n$  行表示第  $n$  个状态变量  $x_n$  对  $r$  个输入矢量  $u$  的关系.

在式(7)中, 设

$$S_\alpha = g_x^{-1} \cdot g_\alpha. \quad (9)$$

其中:  $S_\alpha$  为  $n \times p$  阶矩阵, 其第  $n$  行表示第  $n$  个状态变量  $x_n$  对  $p$  个参数矢量  $u$  的关系. 将式(8)和(9)代入(7), 可得

$$\Delta x = -S_u \cdot \Delta u - S_\alpha \cdot \Delta\alpha. \quad (10)$$

式(10)为参数矢量变化  $\Delta\alpha$  和输入矢量变化  $\Delta u$  引起状态变量变化  $\Delta x$  的近似表达,  $S_\alpha$  表示参数矢量  $\alpha$  的含时变元素的  $m \times p$  阶参数灵敏度矩阵,  $S_u$  表示输入矢量  $u$  的含时变元素的  $m \times r$  阶输入灵敏度矩阵.

当只研究参数矢量  $\alpha$  的变化  $\Delta\alpha$  引起各状态变量  $x_n$  的变化  $\Delta x_n$  的总和, 而不考虑输入矢量的变化时, 式(10)可简化为

$$\Delta x = -S_\alpha \cdot \Delta\alpha. \quad (11)$$

系统的输出方程可以表示为

$$\Delta Y = C \cdot \Delta x + D = -C \cdot S_\alpha \cdot \Delta\alpha + D. \quad (12)$$

其中:  $C$  和  $D$  为输出方程系数矩阵, 当计算出参数灵敏度矩阵  $S_\alpha$  时, 即可计算出各参数变化引起的输出变量变化  $\Delta Y$ .

## 4 动态灵敏度分析

### 4.1 两种一阶灵敏度分析方法结果对比

由于伺服缸活塞杆位移、速度, 伺服阀阀芯位移、速度、加速度以及伺服缸两腔压力等状态向量初值都为0, 也就是  $x_0 = 0$ , 参数灵敏度矩阵  $S_\alpha$  的初值可表示为

$$S_{\alpha 0} = 0_{m \times p}. \quad (13)$$

在 Matlab 中对各参数灵敏度矩阵进行求解, 将所求得的控制参数相对于系统输出位移的灵敏度矩阵相反数与 3.1 节中一阶轨迹灵敏度分析所求得的结果进行对比, 由于篇幅所限, 只列出第 2 种工况 (2 Hz 频率, 1.5 mm 偏移量, 1 mm 幅值) 下各参数动态灵敏度对比曲线, 如图 8 所示, 其中虚线为二阶轨迹, 实线为一阶矩阵.

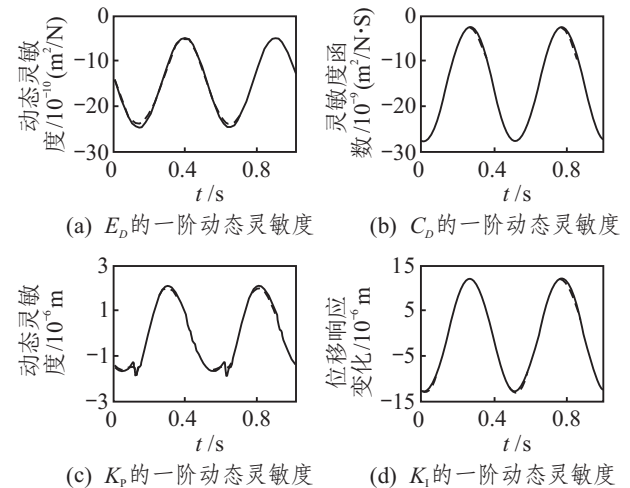


图 8 各参数变化引起的矩阵和轨迹变化

由图 8 中可以看出: 一阶矩阵灵敏度与一阶轨迹灵敏度所计算出的 4 个控制参数的动态灵敏度曲线偏差较小, 特别地, 对比 3.1 节中结果可以发现, 一阶矩阵灵敏度所计算出的值在一定程度上更加接近二阶轨迹灵敏度的计算结果, 其计算精度优于一阶轨迹灵敏度, 同时在求解过程中只需进行简单的二维矩阵运算, 避免了求解复杂的时变系数微分方程, 所以一阶矩阵灵敏度分析方法在本文研究范围内优于一阶轨迹灵敏度分析方法. 但由于高阶多维数的矩阵运算繁琐程度不一定相比于求解时变系数微分方程计算量小, 所以高阶矩阵灵敏度分析法是否优于高阶轨迹灵敏度分析法尚无法确定, 还需再做深入研究, 本文不予讨论.

### 4.2 各工况下灵敏度结果对比

为便于对比各工况下各参数动态灵敏度差异, 根据式(12)计算得出各参数增加 10% 时对系统位移响应产生的变化过程对比曲线, 如图 9 所示, 其中实线为期望刚度, 虚线为比例增益, 点线为期望阻尼, 点划

线为积分增益。

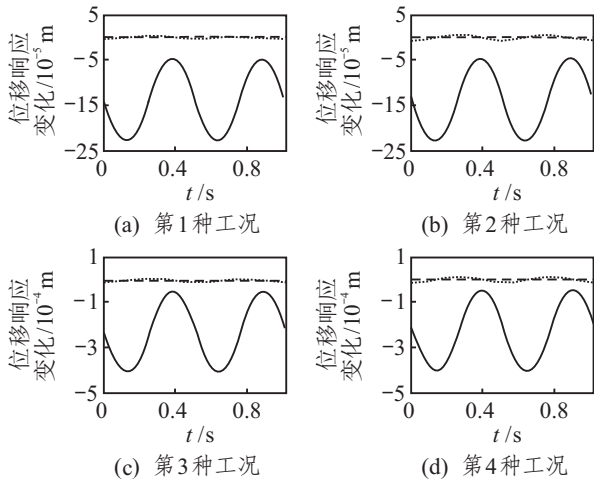


图9 各工况下参数增加10%时的位移响应变化

由图9可以看出: 1) 各参数的变化对阻抗控制位移输出的影响随正弦干扰位置呈现周期变化, 其中期望刚度  $E_D$  的变化对输出位移影响远远大于其他3个控制参数且随正弦干扰力呈负正弦变化。期望阻尼  $C_D$  的变化对输出位移影响介于  $E_D$  与两内环控制参数  $K_P$  和  $K_I$  之间, 随正弦干扰力呈负余弦变化。  $K_P$  和  $K_I$  的变化对输出位移影响小于其他两参数对输出位移影响的数量级。可以看出, 外环控制参数的变化相对于内环控制参数的变化对位移输出的影响较为敏感。 2) 各参数的变化对阻抗控制位移输出的影响的数量级随正弦干扰位置幅值增加而增加, 而与正弦干扰位置频率关系不大。

### 5 灵敏度定量分析

#### 5.1 灵敏度指标

本节引入两个参数灵敏度衡量指标来定量分析各工况下各参数变化对阻抗控制位移输出主要性能指标的影响程度。针对正弦响应重要性能指标幅值衰减, 定义在一个稳定正弦周期内参数变化引起输出位移幅值衰减变化量的平均值为第一项参数灵敏度衡量指标  $S_1$ , 其具体形式表示如下:

$$S_1 = \text{mean}(\Phi_1 + \Phi_2). \quad (14)$$

其中

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= [\max(x_r - x_e) - \max(x_1 - \mathbf{S}_\alpha^1 \cdot \Delta\alpha_i)] - \\ &[\max(x_r - x_e) - \max(x_1)] = \\ &\max(x_1) - \max(x_1 - \mathbf{S}_\alpha^1 \cdot \Delta\alpha_i), \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \Phi_2 &= [\min(x_r - x_e) - \min(x_1)] - [\min(x_r - x_e) - \\ &\min(x_1 - \mathbf{S}_\alpha^1 \cdot \Delta\alpha_i)] = \\ &\min(x_1 - \mathbf{S}_\alpha^1 \cdot \Delta\alpha_i) - \min(x_1). \end{aligned} \quad (16)$$

同样地, 针对正弦响应另一项重要的性能指标相角滞后, 定义在一个稳定正弦周期内参数变化引起相

角滞后变化量的平均值为第二项参数灵敏度衡量指标  $S_2$ , 其具体表达形式如下:

$$S_2 = \text{mean}(\Psi), \quad (17)$$

其中

$$\begin{aligned} \Psi &= \left[ \arcsin\left(\frac{x_r - x_e}{\max(x_r - x_e)}\right) - \right. \\ &\arcsin\left(\frac{x_1 - \mathbf{S}_\alpha^1 \cdot \Delta\alpha_i}{\max(x_1 - \mathbf{S}_\alpha^1 \cdot \Delta\alpha_i)}\right) \left. \right] - \\ &\left[ \arcsin\left(\frac{x_r - x_e}{\max(x_r - x_e)}\right) - \right. \\ &\arcsin\left(\frac{x_1}{\max(x_1)}\right) \left. \right]. \end{aligned} \quad (18)$$

结合上述两项灵敏度指标  $S_1$  和  $S_2$ , 可以定量分析各参数变化对阻抗控制位移输出的影响程度。

#### 5.2 各工况下灵敏度柱形图对比

由式(14)~(18)可得, 在本文研究的4种工况下, HDU基于力的阻抗控制4个主要控制参数增加10%时的两项灵敏度指标柱形图如图10~图13所示。

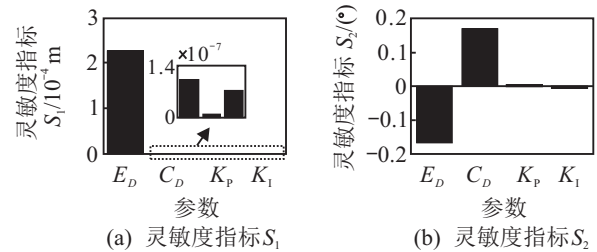


图10 第1种工况下参数变化时灵敏度指标

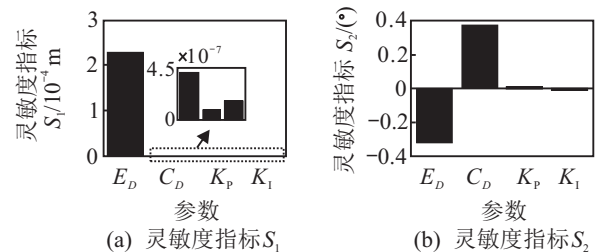


图11 第2种工况下参数变化时灵敏度指标

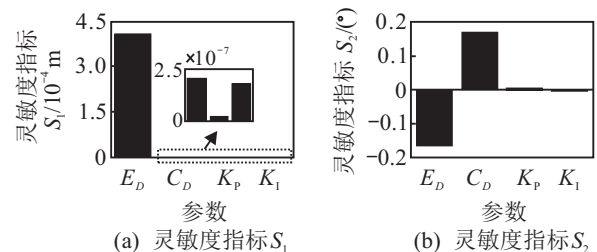


图12 第3种工况下参数变化时灵敏度指标

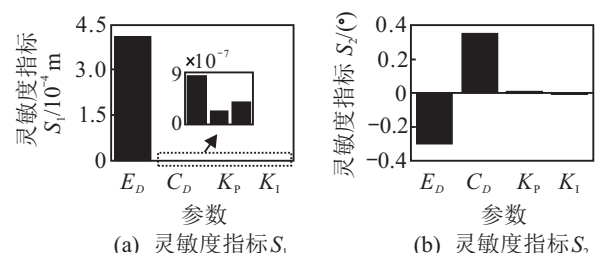


图13 第4种工况下参数变化时灵敏度指标

由图10~图13可以看出:1) 4个控制参数的 $S_1$ 值在各工况下均为正值,说明4个参数的增大都会造成输出位移幅值衰减减少.其中:期望刚度 $E_D$ 的 $S_1$ 值在数量级上远大于其他3个控制参数,且其值与干扰位置幅值相关,与干扰位置频率关系不大,在第1种工况下其增大10%时会减少大约0.2mm的幅值衰减,说明其变化会显著影响位移输出的幅值衰减;比例增益 $K_P$ 的值相对于期望阻尼 $C_D$ 和积分增益 $K_I$ 的 $S_1$ 值较大,且这3个参数的 $S_1$ 值既与干扰位置幅值相关也与干扰位置频率相关,这3个参数增加10%时对输出位移幅值衰减的影响数量级在 $0.1\mu\text{m}$ .2) 4个控制参数的 $S_2$ 值在各工况下正负号不同,说明4个参数的增大会对输出位移相角滞后产生不同影响.其中: $E_D$ 与 $C_D$ 的 $S_2$ 值大小近似相等但符号相反,且与干扰力的频率相关,而与干扰力的幅值关系不大,它们的增大对输出位移相角滞后产生截然不同的影响,在第1种工况下它们增大10%时会对相角滞后产生大约 $0.15^\circ$ 偏移;两个内环控制参数 $K_P$ 和 $K_I$ 的 $S_2$ 值在数量级上远小于相对于阻抗控制外环两个控制参数,且干扰力幅值与频率都相关,他们增大10%时对相角滞后产生角度偏移量数量级在 $0.001^\circ$ .

### 6 实验分析

控制参数相比于结构参数和部分工作参数而言,可以进行实时改变和在线检测,针对定量灵敏度分析主要对5.2节中研究的4种工况下各参数的两项灵敏度指标进行实验研究,为保证实验结果的准确性,采用多样本求均值的方法进行实验测试.将实测数据与一阶矩阵灵敏度所得的仿真结果进行对比,整理得出在4种工况下,上述4个参数增加10%时两项灵敏度指标实验值与仿真值对比如图14~图17所示,其中黑色柱形为真值,白色柱形为实验值.

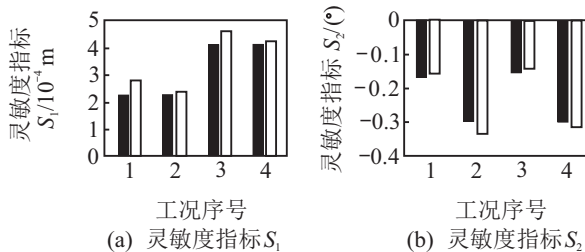


图14  $E_D$ 的两项灵敏度指标

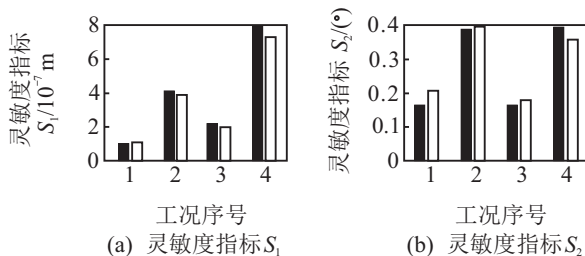


图15  $C_D$ 的两项灵敏度指标

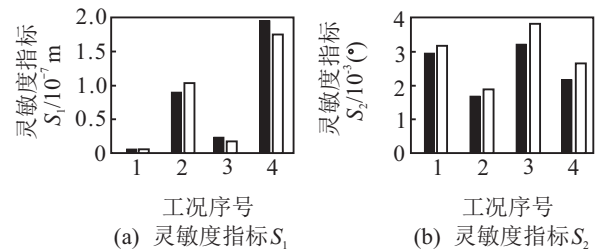


图16  $K_P$ 的两项灵敏度指标

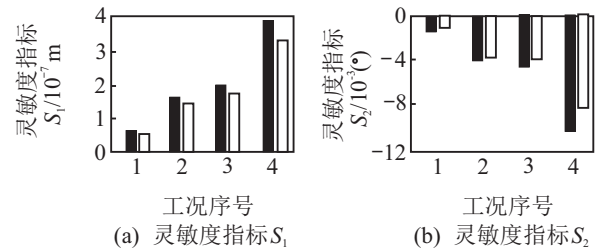


图17  $K_I$ 的两项灵敏度指标

在图14~图17中,各参数两项灵敏度指标实验与仿真最大偏差和平均偏差值如表3所示.

表3 各参数两项灵敏度指标实验和仿真偏差 %

参数	$S_1$ 最大偏差	$S_1$ 平均偏差	$S_2$ 最大偏差	$S_2$ 平均偏差
$E_D$	20	13	12	7
$C_D$	8	5	19	10
$K_P$	27	17	22	10
$K_I$	17	9	19	8

结合图14~图17和表3可以看出,在各工况下各参数两项灵敏度指标实验与仿真值在数量级上一致且变化规律相似.其中:除了 $K_P$ 的 $S_1$ 最大偏差为27%,其余3个参数的 $S_1$ 最大偏差均小于20%,并且该4个参数的 $S_1$ 平均偏差均在17%以内;除了 $E_D$ 的 $S_2$ 最大偏差最小且为12%,其余3个参数的 $S_2$ 最大偏差均在20%左右,该4个参数的 $S_2$ 平均偏差均在10%左右.

### 7 结论

本文在足式机器人HDU基于力的阻抗控制系统非线性数学模型的基础上,使用一阶矩阵灵敏度分析研究了基于力的阻抗控制中4个主要控制参数变化对控制性能的影响程度,使用两项灵敏度衡量指标进行了灵敏度定量分析,并进行了实验测试,得到如下结论:1) 基于力的阻抗控制实际位移值小于期望位移值,幅值衰减量均为正值,其中幅值衰减量随着干扰力幅值的增加而增加,与干扰力频率关系不大;相角滞后量随着干扰力频率的增加而增加,而与干扰力幅值关系不大.2) 各控制参数的变化对阻抗控制实际位置的影响随正弦干扰位置呈现周期变化,并且各控制参数的变化对阻抗控制实际位置的影响的数量级随正弦干扰位置幅值增加而增加,而与正弦干扰位置频率关系不大.3) 4个控制参数的第1项灵敏度指



标值在各工况下均为正值,说明4个参数的增大都会造成阻抗控制实际位置幅值衰减减少。4个控制参数的第2项灵敏度指标值在各工况下正负号不同,说明4个参数的增大会对阻抗控制实际位置相角滞后产生不同影响。

### 参考文献(References)

- [1] 巴凯先, 孔祥东, 朱琦歆, 等. 液压驱动单元基于位置/力的阻抗控制与实验研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(12): 172-186.  
(Ba K X, Kong X D, Zhu Q X, et al. Mechanism analysis and experimental research of based on the position/force control impedance on hydraulic drive unit[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(12): 172-186.)
- [2] Irawan A, Nonami K. Optimal impedance control based on body inertia for a hydraulically driven hexapod robot walking on uneven and extremely soft terrain[J]. Journal of Field Robotics, 2011, 28(5): 690-713.
- [3] 丁良宏, 王润孝, 冯华山, 等. 浅析BigDog四足机器人[J]. 中国机械工程, 2012, 23(5): 505-514.  
(Ding L H, Wang R X, Feng H S, et al. Brief analysis of a bigDog quadruped robot[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012, 23(5): 505-514.)
- [4] Xu Z, Gao J Y, Li H, et al. The modeling and controlling of electrohydraulic actuator for quadruped robot based on fuzzy proportion integration differentiation controller[J]. Journal of Mechanical Engineering and Science, 2014, 228(14): 2557-2568.
- [5] Ba K X, Yu B, Kong X D, et al. The dynamic compliance and its compensation control research of the highly integrated valve-controlled cylinder position control system[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2017, 15(4): 1814-1825.
- [6] Li M T, Jiang Z Y, Wang P F, et al. Control of a quadruped robot with bionic springy legs in trotting gait[J]. Journal of Bionic Engineering, 2014, 11(2): 188-198.
- [7] Kimura H, Fukuoka Y, Cohen A H. Adaptive dynamic walking of a quadruped robot on natural ground based on biological concepts[J]. International Journal of Robotics Research, 2003, 22(3): 187-202.
- [8] Poulakakis I, Smith J A, Buehler M. Modeling and experiments of untethered quadrupedal running with a bounding gait: The scout II robot[J]. International Journal of Robotics Research, 2005, 24(4): 239-256.
- [9] Nichol J G, Singh S P N, Waldron K J, et al. System design of a quadrupedal galloping machine[J]. International Journal of Robotics Research, 2004, 23(10): 1013-1027.
- [10] Seok S, Wang A, Meng Y C, et al. Design principles for highly efficient quadrupeds and implementation on the MIT Cheetah robot[C]. IEEE Int Conference on Robotics and Automation. New York: IEEE, 2013: 3307-3312.
- [11] Buchli J, Kalakrishnan M, Mistry M, et al. Compliant quadruped locomotion over rough terrain[C]. International Conference on Intelligent Robots and Systems. New York: IEEE, 2009: 814-820.
- [12] Playter R, Buehler M, Raibert M. Unmanned Systems Technology[M]. Bellingham: SPIE, 2006: 1-6.
- [13] Semini C, Barasuol V, Boaventura T, et al. Towards versatile legged robots through active impedance control[J]. International Journal of Robotics Research, 2015, 34(7): 1003-1020.
- [14] Rong X, Li Y, Ruan J, et al. Design and simulation for a hydraulic actuated quadruped robot[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2012, 26(4): 1171-1177.
- [15] Focchi M, Barasuol V, Havoutis I, et al. Local reflex generation for obstacle negotiation in quadrupedal locomotion[C]. International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines. Singapore: World Scientific Publ Co Pte Ltd, 2015: 443-450.
- [16] Hutter M, Gehring C, Bloesch M, et al. Starleth: A compliant quadrupedal robot for fast, efficient, and versatile locomotion[C]. 15th International Conference on Climbing and Walking Robot-CLAWAR. Singapore: World Scientific Publ Co Pte Ltd, 2012: 904.
- [17] Vilenus M. The application of sensitivity analysis to electrohydraulic position control servos[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 1983, 105(2): 77-82.
- [18] Farasat S, Ajam H. Sensitivity analysis of parameter changes in nonlinear hydraulic control systems[J]. International Journal of Engineering, 2005, 18(3): 239-252.
- [19] Kong X D, Yu B, Quan L X, et al. Nonlinear mathematical modeling and sensitivity analysis of hydraulic drive unit[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2015, 28(5): 999-111.
- [20] Kong X D, Ba K X, Yu B, et al. Trajectory sensitivity analysis of first order and second order on position control system of highly integrated valvecontrolled cylinder[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2015, 29(10): 4445-4464.

### 作者简介

俞滨(1985—), 男, 副教授, 博士, 从事电液伺服控制及其应用等研究, E-mail: yb@ysu.edu.cn;

巴凯先(1989—), 男, 讲师, 博士, 从事电液伺服控制的研究, E-mail: bkg@ysu.edu.cn;

刘雅梁(1994—), 男, 博士, 从事电液伺服控制及应用的研究, E-mail: liuyaliang666@163.com;

王东坤(1992—), 男, 硕士生, 从事电液伺服控制及应用的研究, E-mail: 752670264@qq.com;

马国梁(1995—), 男, 硕士生, 从事电液伺服控制及应用的研究, E-mail: mgl@stumail.yzu.edu.cn;

孔祥东(1959—), 男, 教授, 博士生导师, 从事电液伺服控制及应用等研究, E-mail: xdkong@ysu.edu.cn.