

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311618

基于变波阻抗控制策略的六足机器人双边遥操作*

李佳钰^{1,2}, 张喜洋¹, 于晓洋³, 刘宇飞⁴, 尤波¹

(1. 哈尔滨理工大学黑龙江省复杂智能系统与集成重点实验室 哈尔滨 150080; 2. 布里斯托机器人实验室 英国 BS16 1QY; 3. 哈尔滨理工大学测控技术与通信工程学院 哈尔滨 150080; 4. 中兵智能创新研究院有限公司 北京 100072)

摘要:针对变时延条件下六足机器人行进任务中的跟踪性较差问题,本文提出了一种基于波阻抗在线补偿策略的六足机器人双边遥操作控制方法。该策略以四通道控制架构为基础,采用时延预估器对通信时延进行预估,并设计波阻抗在线调整规则,以此提高系统的跟踪性。同时结合时域无源性控制方法,对通信环节与环境端潜在的有源性进行二次补偿,保证系统的绝对无源,利用 Llewellyn 准则设计主从端的控制律参数。搭建基于 Vortex 半物理仿真实验平台与实物实验平台对本文所提出的方法进行验证。实验结果表明变波阻抗控制结合时域无源性控制可以保证系统的无源性,相对于传统双边遥操作速度跟踪性提高了 84.3%,力波动范围降低了 84.7%。

关键词: 六足机器人; 遥操作; 变时延; 变波阻抗; 时域无源控制

中图分类号: TP24 TH39 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.30

Bilateral teleoperation of hexapod robot based on variable wave impedance control strategy

Li Jiayu^{1,2}, Zhang Xiyang¹, Yu Xiaoyang³, Liu Yufei⁴, You Bo¹

(1. Heilongjiang Key Laboratory of Complex Intelligent Systems and Integration, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China; 2. Bristol Robotics Laboratory, BS16 1QYD, United Kingdom; 3. School of Measurement and Control Technology and Communication Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China; 4. China weapon Intelligent Innovation Research Institute limited company, Beijing 100072, China)

Abstract: To address the issue of poor tracking performance in locomotion tasks of hexapod robots under variable time delay conditions, this article proposes a bilateral teleoperation control method based on a wave impedance online compensation strategy. The strategy is built upon a four-channel control architecture and incorporates a delay estimator to predict communication delays. It further designs online adjustment rules for wave impedance to improve the system's tracking performance. Additionally, the time-domain passivity control method is combined to provide a secondary compensation for potential activeness in the communication link and the environmental side, which could ensure the system's absolute passivity. The control law parameters for the master and slave ends are designed by using the Llewellyn criterion. The proposed method is evaluated through the construction of a semi-physical simulation experimental platform and a physical experimental platform based on Vortex. Experimental results show that variable wave impedance control combined with time domain passivity control can ensure the passivity of the system. Compared with traditional bilateral teleoperation, the speed tracking performance is improved by 84.3%, and the force fluctuation range is reduced by 84.7%.

Keywords: hexapod robot; teleoperation; variable delay; variable wave impedance; time-domain passivity control

收稿日期: 2023-07-03 Received Date: 2023-07-03

* 基金项目: 黑龙江省自然科学基金联合引导(LH2020E088)、机器人技术与系统国家重点实验室开放基金(SKLRs-2022-KF-18)、国家自然科学基金青年科学基金(52205035)、国家自然科学基金(91948202, 52175012)项目资助。

0 引言

近年来,随着足式机器人技术日趋成熟,其在灾难救援、海空探索、勘探等领域得到了广泛的运用^[1],足式机器人虽然可以取代人类出现在危险的工作环境中,但由于工作现场的复杂程度不可预期^[2],若单纯依靠机器人自身的智能控制算法难以保证机器人自主适应复杂多变工况下的任务需求^[3-4]。遥操作技术可以将人的感知、决策能力融入整个控制系统中^[5],保证人类安全的同时满足六足机器人面对复杂工况下的控制需求。然而,遥操作控制中通信时延问题是不可避免的,研究表明,即使很小的时延,也可能导致整个系统的不稳定,为克服通信时延引起的系统不稳定,早期采用的是“移动-等待”策略,然而这种方法不仅会浪费大量的时间,而且会增大操作者的操作负担^[6-7]。依据二端口网络理论设计遥操作系统的方法^[8],证明通信时延是导致系统不稳定的根本原因。Anderson^[9]提出的散射理论可保证任意时延下系统的稳定性。Niemeyer等^[10]对散射理论进行了扩展,提出了波变量法,利用能量流理论来补偿通信环节的有源性问题。此后,波变量理论在遥操作系统中得到了广泛应用。但是,对于时变时延条件下,波变量法无法保证系统的稳定,同时会引起系统跟踪性降低。Munir等^[11]将波变量与Smith预估器进行结合,同时结合卡尔曼滤波器,以此保证时变时延条件下系统的稳定性与透明性,但系统中的参数较难确定。Zheng等^[12]提出了一种新的波变量时延补偿四通道结构,但仍存在严重的波反射问题。郝爽^[13]将波变量法与扰动观测器相结合,以此解决时变时延问题,但对参数选取较为苛刻且仅适用于较小时延条件下。后续有学者们利用时域无源性控制方法,通过无源性观测器(passivity observer, PO)监测系统的能量流,并由无源性控制器(passivity controller, PC)对有源性能量进行耗散,该方法可以保证时变时延条件下系统的稳定性,但会降低系统的透明性^[14],又将时域无源性控制方法应用到四通道控制架构,保证了四通道控制结构任意时延下的稳定性,但没有解决系统跟踪性较差的问题^[15]。

六足机器人在执行任务时足地接触可能会呈现出有源性^[16-17]。本文基于波变量法对通信环节进行补偿,针对波变量法解决时变时延引起的系统跟踪性降低问题,提出波阻抗在线调整策略,设计波阻抗在线调整规则,以此提高系统的跟踪性。此外,针对波变量法无法保证任意时延变化下通信环节无源性以及环境端的潜在有源性问题,结合时域无源性控制方法,使系统能够满足时变时延条件下良好的跟踪性,并保证系统的稳定性。

1 六足机器人遥操作系统

1.1 遥操作系统整体方案

在本文中,六足机器人需适应野外工作或极限环境^[18],所面对的工作环境存在着诸多的未知因素,如足底滑移以及其他外力等可能会造成环境端呈现出有源性,因此需要对环境端的潜在有源性问题进行补偿。通信时延是遥操作系统不可避免的^[19],传统的波变量方法对于时变时延来说不仅会降低系统的跟踪性,也无法保证系统的稳定性。本文提出基于波阻抗在线补偿策略,采用时延预估器对时变时延进行在线辨识,以此设计波阻抗在线更新规则,提高系统的跟踪性。同时,分析通信环节和环境端的有源性,基于时域无源性控制建立统一的表达形式,对溢出的有源性能量进行综合耗散,保证系统的稳定性。

1.2 主端机器人建模

主端机器人动力学模型如下:

$$M_m \ddot{q}_m + B_m \dot{q}_m = F_h + u_m \quad (1)$$

式中: M_m 代表主端机器人的质量; B_m 代表阻尼系数; F_h 代表操控者作用在主端机器人上的力; u_m 代表主端机器人的控制律; q_m 代表主端机器人的位置指令。

在对六足机器人机身速度进行跟踪时,为保证主端子系统的可操作性,在主端机器人原动态方程中引入一个新的控制变量 $r_m = q_m + \lambda \dot{q}_m$ ($0 < \lambda < 1$),通过在原始位置变量中加入阻尼项,以保证主端子系统的输出无源性,修正后的主端控制律为 $u_m = u_m^* + \bar{u}_m$, 式中 u_m^* , \bar{u}_m 分别为局部控制律和全局控制律,且 $u_m^* = -\hat{M}_m \dot{q}_m - \hat{B}_m q$, 修正后的主端机器人动力学模型为:

$$\bar{M}_m \dot{r}_m + \bar{B}_m r_m = F_h + \bar{u}_m \quad (2)$$

式中: $\bar{M}_m = M_m / \lambda$, $\bar{B}_m = \hat{B}_m$ 。

1.3 从端机器人建模

由于六足机器人本身多自由度冗余的结构当存在系统外界的干扰时,对其运动能力造成一定的影响,从运动学角度分析,可以将机身的速度损失看作环境端外力对机身综合作用的结果,对六足机器人的作用力可以描述为:

$$\delta_e = M_s (\dot{v}_d - \dot{v}_s) \quad (3)$$

式中: δ_e 表示环境端对六足机器人的作用力; M_s 表示从端机器人的质量; v_d 表示六足机器人机身的期望速度指令; v_s 表示机身经环境端作用后的实际速度。

2 系统架构分析

2.1 波变量控制架构

在波变量控制方法中,将主端速度 \mathbf{v}_m 和主端力 \mathbf{f}_m 转换成波信号 U_m 和 V_m 进行传输,到达从端后再解算出从端速度 \mathbf{v}_s 和从端力 \mathbf{f}_s , 控制结构如图 1 所示。

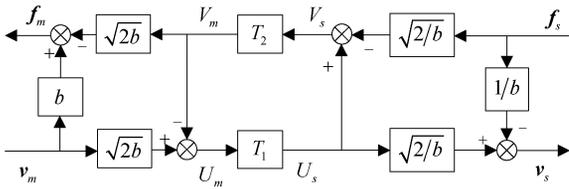


图 1 波变量控制结构

Fig. 1 Wave variable control structure

图 1 中 U_m 和 V_s 表示主端和从端的输入波变量, V_m 和 U_s 表示主端和从端的输出波变量, T_1 和 T_2 表示通信时延, b 表示波阻抗。

2.2 通信环节有源性分析

波变量法对于时变时延来说,通信环节的无源性将不能保证,通信环节吸收的能量可表示为:

$$\begin{aligned} \int_0^t P_{in}(\tau) d\tau &= \int_0^t (\mathbf{f}_m(\tau) \mathbf{v}_m(\tau) - \mathbf{f}_s(\tau) \mathbf{v}_s(\tau)) d\tau = \\ &= \frac{1}{2} \left(\int_{t-T_1(t)}^t U_m^T(\tau) U_m(\tau) d\tau + \int_{t-T_2(t)}^t V_s^T(\tau) V_s(\tau) d\tau \right) + \\ &= \frac{1}{2} \left(\int_0^{t-T_1(t)} U_m^T(\tau) U_m(\tau) d\tau + \int_0^{t-T_2(t)} V_s^T(\tau) V_s(\tau) d\tau \right) - \\ &= \frac{1}{2} \left(\int_0^t U_m^T(\tau - T_1(t)) U_m(\tau - T_1(t)) d\tau \right) - \\ &= \frac{1}{2} \left(\int_0^t V_s^T(\tau - T_2(t)) V_s(\tau - T_2(t)) d\tau \right) \end{aligned} \quad (4)$$

令 $\sigma = \tau - T_i(\tau)$, 进一步可得:

$$\begin{aligned} \int_0^t P_{in}(\tau) d\tau &= \frac{1}{2} \int_{t-T_1(t)}^t U_m^T(\tau) U_m(\tau) d\tau + \\ &= \frac{1}{2} \int_{t-T_2(t)}^t V_s^T(\tau) V_s(\tau) d\tau - \frac{1}{2} \int_0^{t-T_1(t)} \frac{\dot{T}_1(\sigma)}{1 - \dot{T}_1(\sigma)} U_m^T(\sigma) \times \\ &= U_m(\sigma) d\sigma - \frac{1}{2} \int_0^{t-T_2(t)} \frac{\dot{T}_2(\sigma)}{1 - \dot{T}_2(\sigma)} V_s^T(\sigma) V_s(\sigma) d\sigma \end{aligned} \quad (5)$$

根据式(5)可以看出,在变时延遥操作系统中当时延变化率为 $\dot{T}_i \leq 0$ 或 $\dot{T}_i > 1$ 时, $\int_0^t P_{in}(\tau) d\tau \geq 0$, 表明通信环节是无源的,反之当 $0 < \dot{T}_i \leq 1$ 时,可能会使通信环节呈现出有源性。

2.3 环境端有源性分析

定义机身速度偏差率为 $D = (\mathbf{v}_d - \mathbf{v}_s) / \mathbf{v}_d$, 根据式(3) 可以将环境端对六足机器人的作用力描述为 $\delta_e = M_s(\dot{\mathbf{v}}_d - \dot{\mathbf{v}}_s)$, 则环境端的能量可以描述为:

$$\begin{aligned} E_e &= \int_0^T \delta_e^T \mathbf{v}_s dt = \\ &= \int_0^T M_s(\dot{\mathbf{v}}_d - \dot{\mathbf{v}}_s) \mathbf{v}_s dt = \\ &= \int_0^T (M_s \dot{\mathbf{v}}_d \mathbf{v}_s - M_s \mathbf{v}_d \dot{\mathbf{v}}_s) dt + \int_0^T (M_s \mathbf{v}_d \dot{\mathbf{v}}_s - M_s \mathbf{v}_s \dot{\mathbf{v}}_s) dt = \\ &= \int_0^T M_s \dot{D} \mathbf{v}_d^2 dt + \int_0^T M_s \delta_u \dot{\mathbf{v}}_s dt \end{aligned} \quad (6)$$

可将式(6)分为两部分 $E_{e1} = \int_0^T M_s \dot{D} \mathbf{v}_d^2 dt$ 和 $E_{e2} = \int_0^T M_s \delta_u \dot{\mathbf{v}}_s dt$, 当足端出现滑移时可分为以下 2 种情况:

1) 足底滑移导致机身速度增加,使得 D 降低,此时 $\dot{D} < 0, \dot{\mathbf{v}}_s > 0$, 使得 $E_{e1} < 0$ 呈现出有源性,若足底滑移导致机身速度增加但仍使得 $\mathbf{v}_d \geq \mathbf{v}_s$, 此时 $E_{e2} \geq 0$ 仍维持无源性,反之若足底滑移导致机身速度增加使得 $\mathbf{v}_d < \mathbf{v}_s$, 则 $E_{e2} < 0$ 呈现出有源性;

2) 足底滑移导致机身速度降低,使得 D 增加,此时 $\dot{D} > 0, \dot{\mathbf{v}}_s < 0$, 可知 $E_{e1} \geq 0$ 仍维持无源性,而 $E_{e2} < 0$ 呈现出有源性。

本节对波变量架构进行分析,并对通信环节与环境段的有源性进行分析,为后文遥操作控制系统架构的设计提供了理论基础。

3 双边遥操作控制系统设计

在实际的遥操作系统中,通信时延往往是时变的,若采用传统的波变量调整波阻抗不仅无法保证通信环节的无源性^[20],而且也不能较好的满足控制需求,影响系统的跟踪性。因此,本文提出了一种基于波阻抗在线补偿策略,采用时延预估器对通信时延进行在线辨识,设计波阻抗在线调整规则,同时结合时域无源性控制方法保证系统的稳定性。

3.1 波阻抗在线调整策略

本文所设计的时延变化率预估器结构如图 2 所示,当通信时延较大时,为保证系统的稳定性,需要选择较小的波阻抗,以牺牲系统跟踪性为代价保证系统的稳定性;当通信时延较小时,较大的波阻抗即可满足系统的稳定性,同时保证了系统良好的跟踪性。本文以此为原则,制定波阻抗在线更新规则,为了减小跟踪误差,采用多次测试得到的系统通信时延均值作为系统的初始时延,以此设置初始波阻抗的大小,而后根据时延预估器估计的时延变化率与采样时间相乘得到预估的时延大小,再与比例映射系数相乘得到波阻抗的变化趋势。波阻抗的更新规则如式(7)所示。

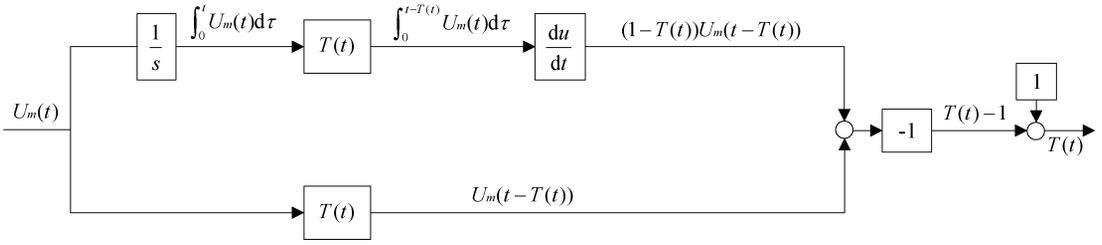


图2 时延预估器结构

Fig. 2 Diagram of time delay estimator

$$\begin{aligned}
 b(0) &= b \\
 b(1) &= b(0) - \alpha(T_f - T_1(0) - T_2(0)) \\
 b(2) &= b(1) - \alpha \dot{T}_a(1) \Delta T \\
 &\dots \\
 b(k) &= b(k-1) - \alpha \dot{T}_a(k-1) \Delta T
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

式中： T_f 表示系统往返总时延多次测试得到的均值，以此值对波阻抗 b 的初始值进行选择， \dot{T}_a 表示前向通道和反向通道总时延变化率， $\alpha > 0$ 表示波阻抗与时延之间的比例映射系数。

3.2 遥操作系统四通道时域无源控制设计

本文结合时域无源性控制方法，建立通信环节能量和环境端能量统一表达式，保证通信环节和环境端的无源性。遥操作四通道系统架构如图3所示。系统各个端口的能量表示为：

$$\begin{aligned}
 E_{M_i}^{in}(k) &= \begin{cases} E_{M_i}^{in}(k-1) + \Delta T \cdot f_{m_i}(k) v_{m_i}(k), & f_{m_i}(k) v_{m_i}(k) \geq 0 \\ E_{M_i}^{in}(k-1), & f_{m_i}(k) v_{m_i}(k) < 0 \end{cases} \\
 E_{M_i}^{out}(k) &= \begin{cases} E_{M_i}^{in}(k-1), & f_{m_i}(k) v_{m_i}(k) \geq 0 \\ E_{M_i}^{in}(k-1) - \Delta T \cdot f_{m_i}(k) v_{m_i}(k), & f_{m_i}(k) v_{m_i}(k) < 0 \end{cases}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E_{S_i}^{in}(k) &= \begin{cases} E_{S_i}^{in}(k-1) - \Delta T \cdot f_{s_i}(k) v_{s_i}(k), & -f_{s_i}(k) v_{s_i}(k) \geq 0 \\ E_{S_i}^{in}(k-1), & -f_{s_i}(k) v_{s_i}(k) < 0 \end{cases} \\
 E_{S_i}^{out}(k) &= \begin{cases} E_{S_i}^{out}(k-1), & -f_{s_i}(k) v_{s_i}(k) \geq 0 \\ E_{S_i}^{out}(k-1) + \Delta T \cdot f_{s_i}(k) v_{s_i}(k), & -f_{s_i}(k) v_{s_i}(k) < 0 \end{cases} \\
 E_e(k) &= \Delta T \sum_{j=0}^k F_e(j) v_s(j)
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

式中： $E_{M_i}^{in}, E_{M_i}^{out}, E_{S_i}^{in}, E_{S_i}^{out}, E_e$ 分别表示端口 i 主端流入、主端流出、从端流入、从端流出通信环节的能量以及代表环境端流入从端的能量， $i = 1, 2$ 分别代表所对应的控制通道，且

$$\begin{aligned}
 E_M^{in}(k) &= E_{M1}^{in}(k) + E_{M2}^{in}(k) \\
 E_S^{in}(k) &= E_{S1}^{in}(k) + E_{S2}^{in}(k) \\
 E_M^{out}(k) &= E_{M1}^{out}(k) + E_{M2}^{out}(k) \\
 E_S^{out}(k) &= E_{S1}^{out}(k) + E_{S2}^{out}(k)
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

式中： $E_M^{in}(k)$ 表示主端流入通信环节的总能量； $E_M^{out}(k)$ 表示通信环节流出到主端的总能量； $E_S^{in}(k)$ 表示从端流入通信环节的总能量； $E_S^{out}(k)$ 表示通信环节流出到从端的总能量。为保证通信环节的无源性，应满足 $E_S^{out}(k) \leq$

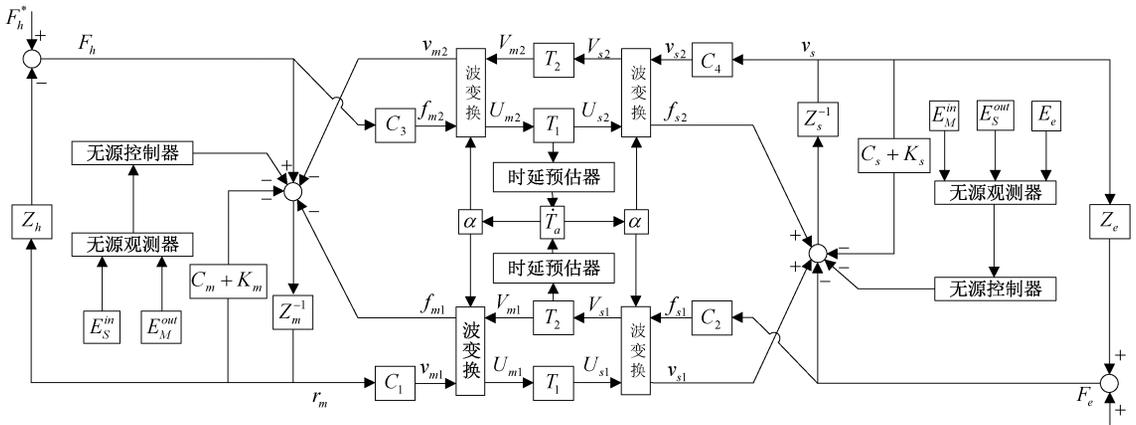


图3 四通道遥操作系统整体架构

Fig. 3 Overall structure of the four channel teleoperation system

$E_M^{in}(k)$ 和 $E_M^{out}(k) \leq E_S^{in}(k)$, 且根据式 (10) 可知 $E_M^{in}(k-1) \leq E_M^{in}(k)$ 、 $E_S^{in}(k-1) \leq E_S^{in}(k)$, 进而得 $E_S^{out}(k) \leq E_M^{in}(k-1)$ 和 $E_M^{out}(k) \leq E_S^{in}(k-1)$ 是通信环节无源性的充分条件。

主端无源性观测器设计为 $0 \sim k - T_2/\Delta T$ 步从端流入通信环节的能量减去 $0 \sim k$ 步主端流出通信环节的能量, 再加上 $0 \sim k - 1$ 步主端 PC1 产生的能量:

$$E_{po1}(k) = E_S^{in}(k - T_2/\Delta T) - E_M^{out}(k) + E_{pc1}(k-1) \quad (10)$$

式中: $E_{pc1}(k) = \Delta T \sum_{j=0}^k (\alpha_1(j) r_m^2(j))$ 。

从端无源性观测器设计为 $0 \sim k - T_1/\Delta T$ 步主端流入通信环节的能量减去 $0 \sim k$ 步从端流出通信环节的能量, 再加上 $0 \sim k$ 步环境端产生的能量以及 $0 \sim k - 1$ 步从端 PC2 产生的能量之和:

$$E_{po2}(k) = E_M^{in}(k - T_1/\Delta T) - E_S^{out}(k) + E_e(k) + E_{pc2}(k-1) \quad (11)$$

式中: $E_{pc2}(k) = \Delta T \sum_{j=0}^k (\alpha_2(j) v_s^2(j))$ 。

无源性控制器则是时变的阻尼系数 α_i 来消耗通信环节和环境端的有源性能量, 当 E_{poi} 为负数时, 说明对应的观测器监测到有源性能量, 需要对相应的阻尼系数 α_i 进行设计, 否则 α_i 设为 0, 主端无源性控制器如式 (12) 所示, 从端无源性控制器如式 (13) 所示。

$$\alpha_1(k) = \begin{cases} -\frac{E_{po1}(k)}{r_m^2(k) \Delta T}, & E_{po1}(k) < 0 \\ 0, & E_{po1}(k) \geq 0 \end{cases} \quad (12)$$

$$\alpha_2(k) = \begin{cases} -\frac{E_{po2}(k)}{v_s^2(k) \Delta T}, & E_{po2}(k) < 0 \\ 0, & E_{po2}(k) \geq 0 \end{cases} \quad (13)$$

主端机器人的控制输入修正为:

$$u_m^* = u_m + \alpha_1(k) r_m(k) \quad (14)$$

从端机器人的控制输入修正为:

$$u_s^* = u_s + \alpha_2(k) v_s(k) \quad (15)$$

由式 (16) 和 (17) 可知, 通过无源性控制器修正后, 通信环节和环境端是无源的。

$$E_{po1}^*(k) = E_{po1}(k) + \alpha_1(k) r_m(k) \Delta T \geq E_{po1}(k) - \frac{E_{po1}(k)}{r_m^2(k) \Delta T} \geq 0 \quad (16)$$

$$E_{po2}^*(k) = E_{po2}(k) + \alpha_2(k) v_s(k) \Delta T \geq E_{po2}(k) - \frac{E_{po2}(k)}{v_s^2(k) \Delta T} \geq 0 \quad (17)$$

3.3 控制律设计

依据四通道遥操作框架设计系统的控制律设计为:

$$\begin{cases} \bar{u}_m = -C_m(r_m(t) - v_s(t - T_2)) - K_m(t)r_m(t) \\ \bar{u}_s = C_s(r_m(t - T_1) - v_s(t)) - K_s(t)v_s(t) \end{cases} \quad (18)$$

依据所设计的系统控制律, 主端模块可以描述为一个双端口网络, 如图 4 所示, 该端口的混合矩阵模型为:

$$\begin{bmatrix} r_m \\ V_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{Z_m + C_m + K_m} & \frac{1}{Z_m + C_m + K_m} \\ C_3 + \frac{Z_s + C_s}{Z_m + C_m + K_m} & \frac{Z_s + C_s}{Z_m + C_m + K_m} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} F_h \\ -F_1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

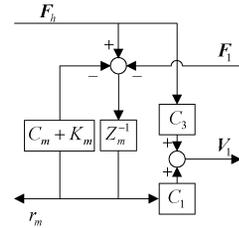


图 4 主端模块双端口网络

Fig. 4 Dual-port network of the primary module

利用 Llewellyn^[21] 绝对稳定性准则可以得到主端模块绝对稳定的约束条件为:

$$\begin{cases} \bar{B}_m + C_m + K_m \geq 0 \\ C_s, C_3 \geq 0 \end{cases} \quad (20)$$

从端模块可以描述为一个双端口网络, 如图 5 所示, 该端口的混合矩阵模型为:

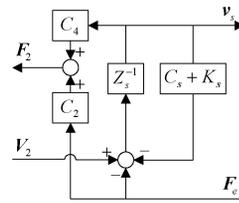


图 5 从端模块双端口网络

Fig. 5 Dual-port network of the secondary module

$$\begin{bmatrix} F_2 \\ F_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_2 & C_2(Z_s + C_s + K_s) + Z_m + C_m \\ 1 & Z_s + C_s + K_s \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_2 \\ -v_s \end{bmatrix} \quad (21)$$

利用 Llewellyn 绝对稳定性准则可以得到从端模块绝对稳定的约束条件为:

$$\begin{cases} C_2, C_m \geq 0 \\ 1 + C_s + K_s \geq 0 \\ C_2(1 + C_s + K_s) + \bar{B}_m + C_m \geq \sqrt{(\bar{M}_m \omega)^2 + (C_2(1 + C_s + K_s) - \bar{B}_m - C_m)} \end{cases} \quad (22)$$

根据式(20)和(22)对控制律参数进行设计,则系统是绝对稳定的。

4 双边遥操作控制系统设计

本节设计了一系列半物理仿真与实物实验来验证提出的基于变波阻抗控制策略的六足机器人双边遥操作控制方法的有效性。在实验中,操作者操控主端机器人发送控制指令,并由通信端口传递至从端,从端将接收到的指令信息作为机身的期望速度,进行行进任务。主端机器人将发出的控制指令与从端机器人实际速度的误差量化为触觉力,并反馈给操作者,以此来辅助操作者进行控制指令的迭代。

4.1 实验平台

实验中主端机器人采用3自由度关节型力反馈设备 Touch X,从端采用基于 Vortex 平台开发的一套六足机器人及其工作环境的仿真模型,实验中从端六足机器人工作于崎岖地形,该六足机器人为重载型机器人且行走于复杂的野外环境中,为保证机器人的安全固其行走速度缓慢。半物理实验平台如图6所示。

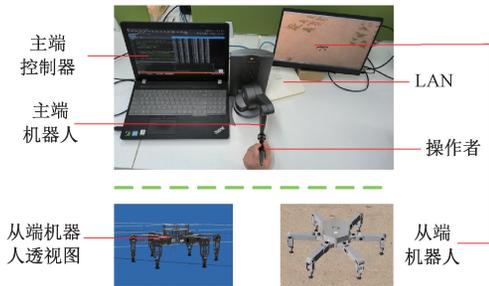


图6 半物理实验平台

Fig. 6 Semi-physical experiment platform

实物实验中的从端机器人为 ElSpider^[22],行走于由不规则小石块和松软沙子搭建的崎岖地形下,确保与半物理仿真环境的一致性,为保证机器人的安全,固采用较为缓慢的行进速度,从端机器人机体速度通过 Optitrack 运动捕捉系统获取。实物实验平台如图7所示。

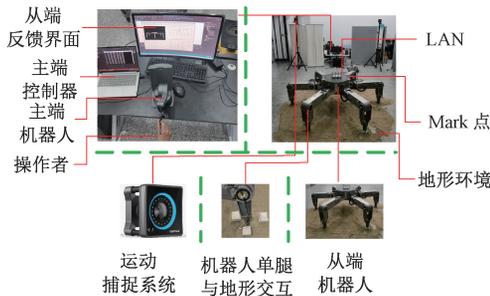


图7 实物实验平台

Fig. 7 Physical experiment platform

4.2 实验任务设计与结果分析

本文设计4组实验对提出的变波阻抗波变量法结合时域无源控制的六足机器人双边遥操作控制方法进行实验验证:

1) 变时延条件下,操作者基于传统波变量法设计的四通道双边遥操作系统架构进行六足机器人在崎岖地形下的速度控制实验,基于速度跟踪曲线分析系统的跟踪性,基于力反馈曲线的波动范围分析操作者的操作负担,同时,基于主、从端及环境端的能量信息,分析系统的稳定性;

2) 变时延条件下,操作者基于波变量法结合时域无源性控制方法设计的四通道双边遥操作系统架构进行实验验证,并与1)中设计的实验进行对比分析;

3) 变时延条件下,操作者基于变波阻抗波变量法结合时域无源性控制方法设计的四通道双边遥操作系统架构进行六足机器人在崎岖地形下的速度控制实验,并与2)中设计的实验进行对比分析;

4) 变时延条件下,操作者基于变波阻抗波变量法结合时域无源性控制方法设计的四通道双边遥操作系统架构进行实物六足机器人在崎岖地形下的速度控制实验,验证算法的有效性。

根据文献[23]可知,本文采用的主端机器人转动惯量为 $M_m = 0.0035 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$,主端机器人动力学模型所引入的新变量设置为 $\lambda = 0.1$ 。根据式(20)和(22)控制律参数设置为 $C_m = 7, K_m = 0.3, C_s = 12, K_s = 0.2, \bar{B}_m = 0.5$ 。波变量法中的波阻抗参数设置为 $b = 4$,变时延 $T_1(t)$ 和 $T_2(t)$ 均设置为 $0.3 \sim 0.7 \text{ s}$ 的随机时延,波阻抗与时延之间的比例映射系数设置为 $\alpha = 10$ 。实物实验中 Optitrack 运动捕捉系统时延在 10 ms 左右与设计的随机时延相比可忽略不计,4组实验结果对比如表1所示。

在变时延条件下,操作者基于四通道架构的传统波变量法对六足机器人进行速度操控实验,实验结果如图8所示。

根据图8(b)可知,当期望速度大于实际速度时,主端机器人反馈给操作者一定的阻力,当期望速度小于实际速度时,主端机器人反馈给操作者一定的拉力,从而辅助操作者进行控制指令的迭代。为避免力反馈在单位时间内出现较大的抖动导致操作者控制失误,从端机器人的速度进行了在线的滤波处理保证了速度的平滑性。在变时延条件下,传统波变量控制架构下的遥操作系统,虽然可以实现主端机器人对从端六足机器人速度的控制,但跟踪性较差,跟踪误差在 $-0.0031 \sim +0.0063 \text{ m/s}$ 之间波动,触觉力在 $-0.356 \sim +0.142 \text{ N}$ 之间波动。根据图8(c)可知,在 $19 \sim 36 \text{ s}, 47 \sim 57 \text{ s}, 71 \sim 89 \text{ s}$ 和 $125 \sim 132 \text{ s}$ 4个时间段内,通信环节流出到从端的能量大于主端流入通信环节的能量,根据图8(d)可知,在 $100 \sim 110 \text{ s}$ 时

表 1 实验结果对比
Table 1 Comparison of experimental results

| 序号 | 实验条件 | 控制策略 | 跟踪误差/(m·s ⁻¹) | 力反馈/N | 通信端 | 环境端 |
|----|------|-----------------------|---------------------------|--------------|-----|-----|
| 1 | 仿真实验 | 基于传统波变量控制方法 | -0.003 1~0.006 3 | -0.356~0.142 | 有源 | 有源 |
| 2 | 仿真实验 | 基于波变量法结合时域无源性控制方法 | -0.002 9~0.002 8 | -0.118~0.107 | 无源 | 无源 |
| 3 | 仿真实验 | 基于变波阻抗波变量法结合时域无源性控制方法 | -0.000 73~0.000 75 | -0.041~0.035 | 无源 | 无源 |
| 4 | 实物实验 | 基于变波阻抗波变量法结合时域无源性控制方法 | -0.004 9~0.004 | -0.06~0.069 | 无源 | 无源 |

间段内,通信环节流出到主端的能量大于从端流入通信环节的能量,即在上述的 5 个时间段内,通信环节是有源的。根据图 8(e)可知,在 49~76 s 和 95~121 s 2 个时间段内,环境端呈现出有源性。

在变时延条件下,基于传统波变量法结合时域无源性控制架构,对六足机器人进行速度操控实验,实验结果如图 9 所示。

根据图 9(a)可知,变时延条件下,传统波变量法结合时域无源性控制架构可以实现主端机器人对从端六足机器人速度的控制,跟踪误差在-0.002 9~+0.002 8 m/s

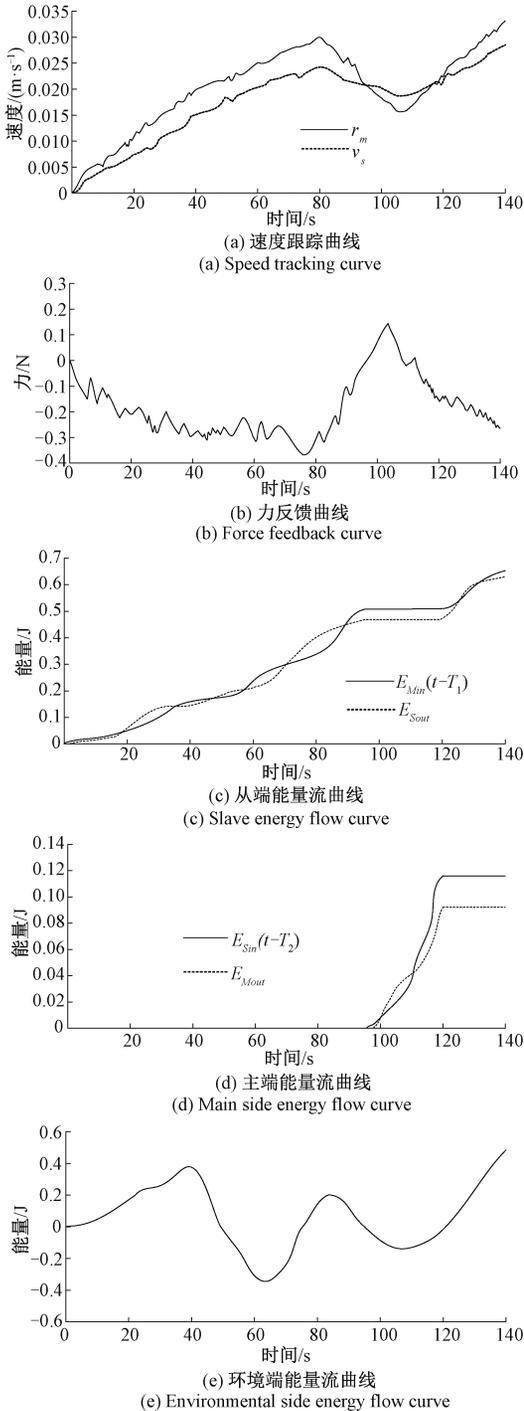
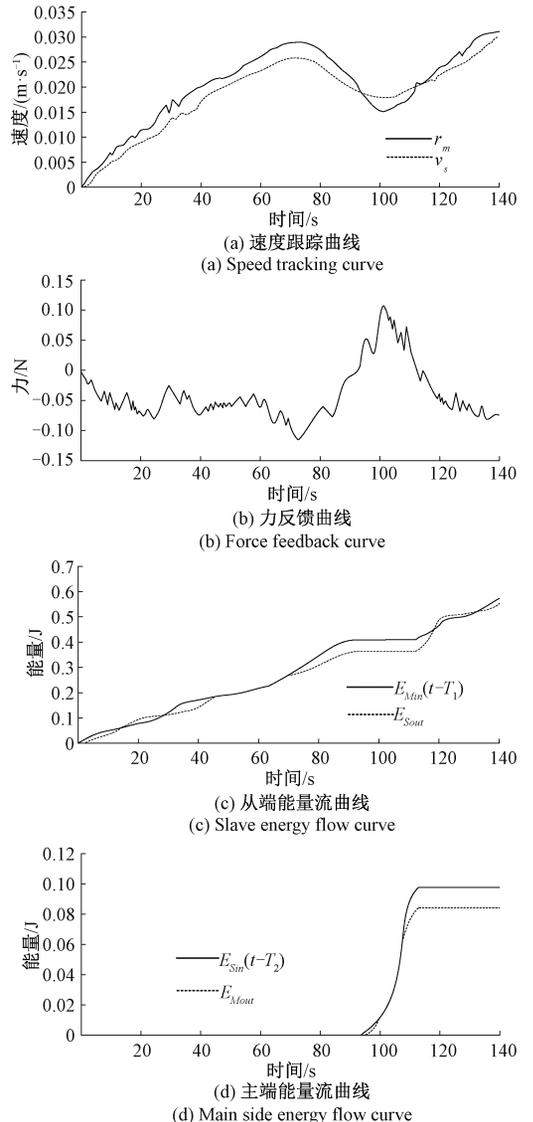


图 8 变时延条件下传统波变量架构遥操作实验结果

Fig. 8 Experimental results of teleoperation of traditional wave variable architecture with variable delay



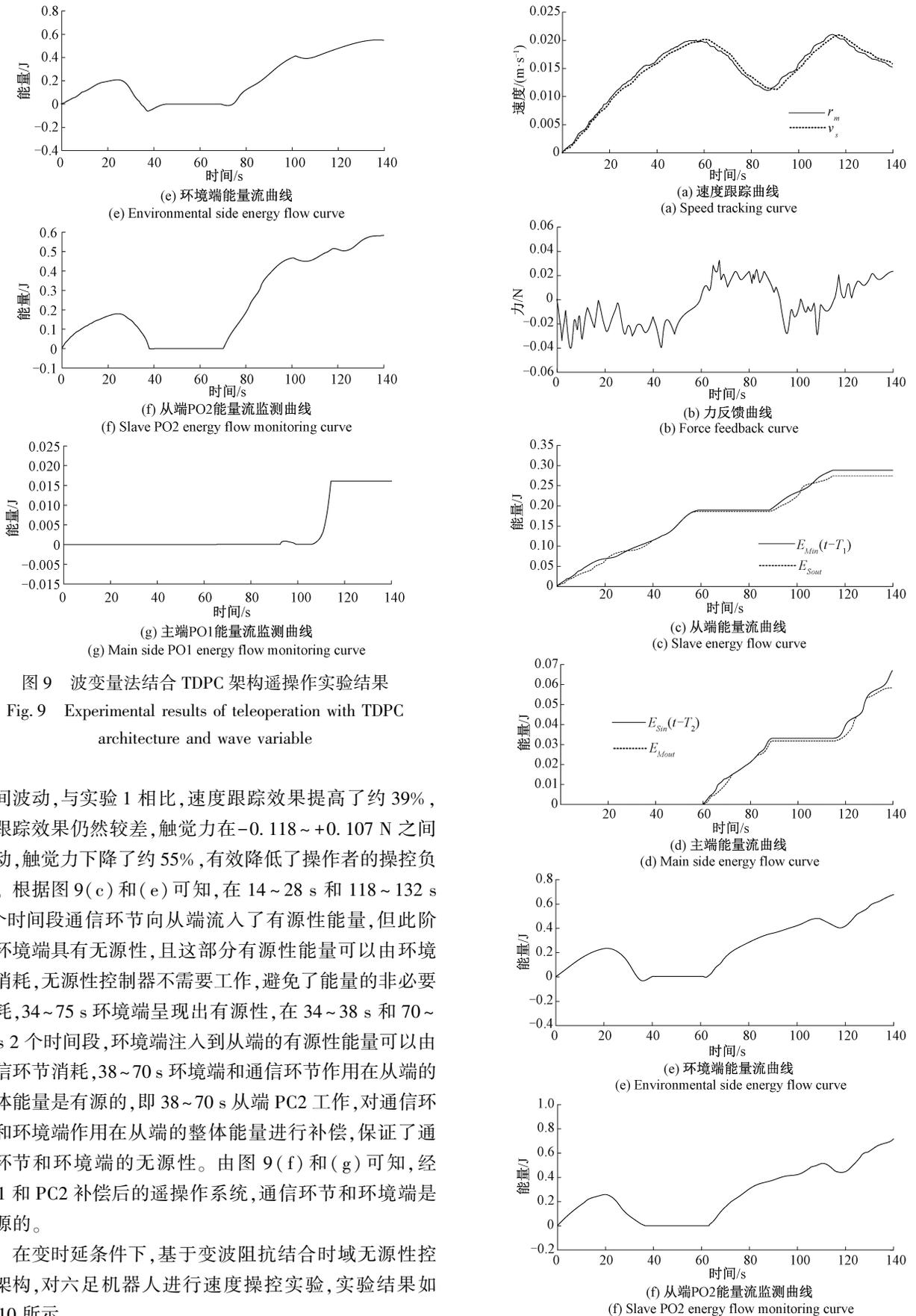


图9 波变量法结合 TDPC 架构遥操作实验结果

Fig.9 Experimental results of teleoperation with TDPC architecture and wave variable

之间波动,与实验1相比,速度跟踪效果提高了约39%,但跟踪效果仍然较差,触觉力在 $-0.118 \sim +0.107 \text{ N}$ 之间波动,触觉力下降了约55%,有效降低了操作者的操控负担。根据图9(c)和(e)可知,在 $14 \sim 28 \text{ s}$ 和 $118 \sim 132 \text{ s}$ 2个时间段通信环节向从端流入了有源性能量,但此阶段环境端具有无源性,且这部分有源性能量可以由环境端消耗,无源性控制器不需要工作,避免了能量的非必要损耗, $34 \sim 75 \text{ s}$ 环境端呈现出有源性,在 $34 \sim 38 \text{ s}$ 和 $70 \sim 75 \text{ s}$ 2个时间段,环境端注入到从端的有源性能量可以由通信环节消耗, $38 \sim 70 \text{ s}$ 环境端和通信环节作用在从端的整体能量是有源的,即 $38 \sim 70 \text{ s}$ 从端PC2工作,对通信环节和环境端作用在从端的整体能量进行补偿,保证了通信环节和环境端的无源性。由图9(f)和(g)可知,经PC1和PC2补偿后的遥操作系统,通信环节和环境端是无源的。

在变时延条件下,基于变波阻抗结合时域无源性控制架构,对六足机器人进行速度操控实验,实验结果如图10所示。

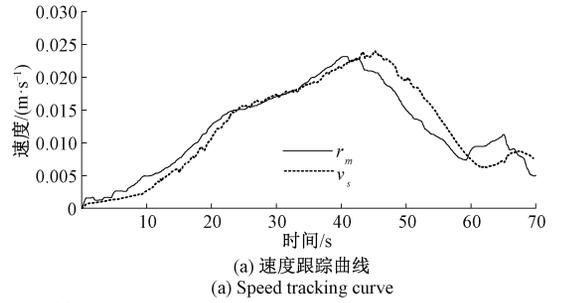
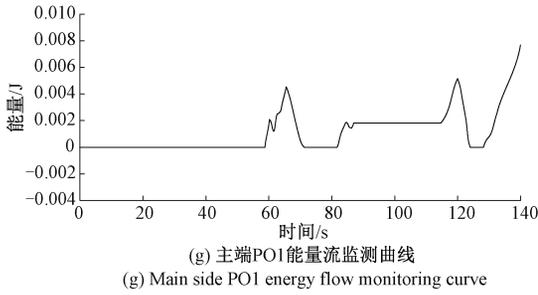
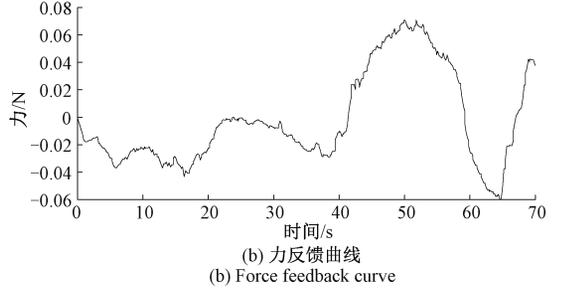
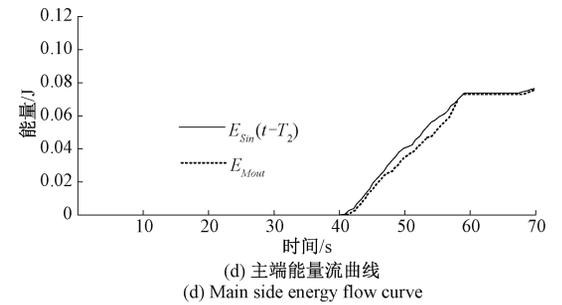
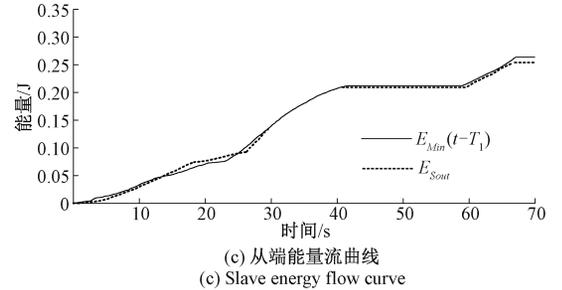


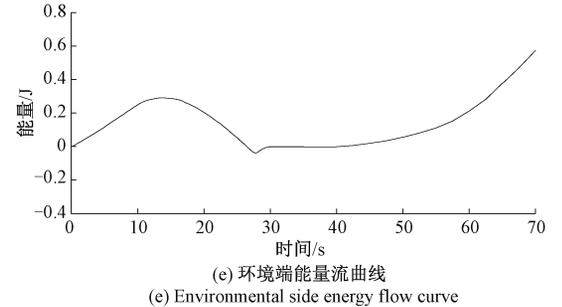
图 10 变波阻抗波变量法结合 TDPC 架构遥操作实验结果
Fig. 10 Experimental results of teleoperation by variable impedance wave variable method combined with TDPC architecture



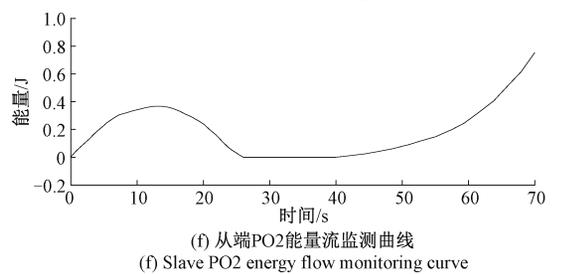
根据图 10(a)可知,变时延条件下,变波阻抗波变量法结合时域无源性控制架构可以实现主端机器人控制从端六足机器人在崎岖地形下平稳行走,并能保证良好的速度跟踪,跟踪误差在 $-0.00069 \sim +0.00071$ m/s 之间波动,根据实验 1 可知,其跟踪误差在 $-0.0031 \sim +0.0063$ m/s 之间波动,这是由于环境端与通信端的有源性问题没有进行处理,导致出现较大的跟踪误差,若忽略环境端与通信端的有源性的速度跟踪情况,其跟踪误差在 $-0.0029 \sim +0.0028$ m/s 之间波动,这说明本文所设计的变波阻抗系统架构可以适应变时延下的控制需求,在跟踪性能方面与波变量法结合 TDPC 的实验相比,得到了明显的提高。根据图 10(b)可知,触觉力在 $-0.041 \sim +0.035$ N 之间波动,进一步降低了操作者的操控负担。根据图 10(c)和(e)可知在 21~30 s、40~57 s 和 102~105 s 3 个时间段,通信环节呈现出有源性,其中 21~30 s 和 102~105 s 2 个时间段通信环节向从端注入的有源性能量可以由环境端消耗,环境端在 34 s 开始呈现出有源性,且在 34~40 s 之间的有源性能量可由通信环节消耗,40 s 开始通信环节和环境端整体呈现出有源性,此时从端 PC2 开始工作,以保证整体的无源性。根据图 10(d)可知,从端流入通信环节的能量始终大于等于通信环节流出到主端的能量,即通信环节是无源的。根据图 10(f)和(g)可知,经 PC1 和 PC2 补偿后的通信环节和环境端是严格无源的。



在变时延条件下,基于变波阻抗结合时域无源性控制架构,对实物六足机器人进行速度操控实验,实验结果如图 11 所示。



根据图 11(a)可知,变时延条件下,变波阻抗波变量法结合时域无源性控制架构可以实现主端机器人控制从端六足机器人在崎岖地形下平稳行走,并能保证速度跟踪,跟踪误差在 $-0.0049 \sim +0.004$ m/s 之间波动,根据图 11(b)可知,触觉力在 $-0.06 \sim +0.069$ N 之间波动,降



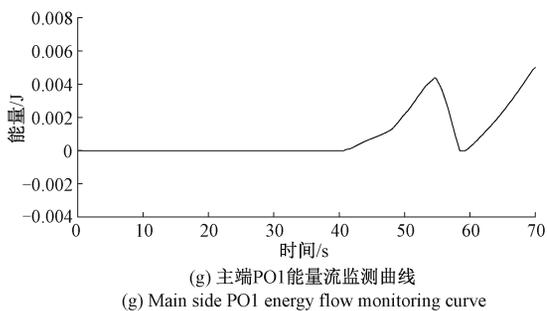


图 11 变波阻抗波变量法结合 TDPIC 架构遥操作实验结果

Fig. 11 Experimental results of teleoperation by variable impedance wave variable method combined with TDPIC architecture

低了操作者的操控负担。根据图 11(c) 和(e) 可知在 28~52 s 和 59~81 s 2 个时间段, 通信环节呈现出有源性, 其中 28~52 s 时间段通信环节向从端注入的有源性能量可以由环境端消耗, 环境端在 53 s 开始呈现出有源性, 且在 53~59 s 之间的有源性能量可由通信环节消耗, 59 s 开始通信环节和环境端整体呈现出有源性, 此时从端 PC2 开始工作, 以保证整体的无源性。根据图 11(d) 可知, 从端流入通信环节的能量始终大于等于通信环节流出到主端的能量, 即通信环节是无源的。根据图 11(f) 和(g) 可知, 经 PC1 和 PC2 补偿后的通信环节和环境端是严格无源的。

综上所述, 基于波变量法结合时域无源性控制遥操作系统架构, 保证了通信环节和环境端无源性, 在此基础上加入波阻抗在线补偿控制策略可以有效提高系统的跟踪性, 同时降低操作者的操控负担。

5 结 论

本文提出了一种基于波阻抗在线补偿策略的六足机器人双边遥操作控制方法。在此遥操作系统中, 针对通信环节存在的变时延问题以及六足机器人环境端存在的潜在有源性问题, 基于波变量法提出了波阻抗在线调整策略, 采用时延预估器对通信时延进行预估, 根据估计的结果设计波阻抗在线调整规则, 并结合 TDPIC 算法保证系统的无源性。实验结果表明, 本文所提出的变波可以保证六足机器人遥操作系统稳定性, 同时兼顾主从端的跟踪性。

参考文献

[1] 陈潇磊, 尤波, 李佳钰, 等. 基于驾驶员模型的六足机器人自主/协同决策 [J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(4):91-100.
CHEN X L, YOU B, LI J Y, et al. Hexapod robot self/collaboration decision based on the driver's prior

model [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(4):101-111.

- [2] YOU B, LI J Y, DING L, et al. Semi-autonomous bilateral teleoperation of hexapod robot based on haptic force feedback [J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2017(2): 1-20.
- [3] 李佳钰, 尤波, 丁亮, 等. 基于双向控制的六足机器人转向遥操作研究 [J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(3): 71-80.
LI J Y, YOU B, DING L, et al. Steering teleoperation of hexapod robot based on bilateral control [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(3):71-80.
- [4] 李佳钰, 黄启霖, 尤波, 等. 基于力估计与切换控制的六足机器人三边遥操作 [J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(1): 253-264.
LI J Y, HUANG Q L, YOU B, et al. Trilateral teleoperation of hexapod robot based on force estimation and switching control [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(1):253-264.
- [5] LI J Y, YOU B, DING L, et al. A novel bilateral teleoperation approach for hexapod robot walking and manipulating with legs [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2018, 108:1-12.
- [6] TÜMERDEM U. Three-channel control architecture for multilateral teleoperation under time delay [J]. Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences, 2019, 27(1): 120-138.
- [7] ZHOU J Y, JIANG Z C, TANG G J. A new approach for teleoperation rendezvous and docking with time delay [J]. Science China Physics, Mechanics and Astronomy, 2012, 55: 339-346.
- [8] LU S, BAN Y, ZHANG X, et al. Adaptive control of time delay teleoperation system with uncertain dynamics [J]. Frontiers in Neurorobotics, 2022, 16: 928863.
- [9] ANDERSON R J. Bilateral control of teleoperation with time delay [C]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1989, 34.
- [10] NIEMEYER G, SLOTINE J. Telemanipulation with time delays [J]. International Journal of Robotics Research, 2004, 23(9):873-890.
- [11] MUNIR S, BOOK W J. Internet-based teleoperation using wave variables with prediction [J]. Mechatronics IEEE/ASME Transactions on, 2002, 7(2):124-133.
- [12] ZHENG C, HUANG F, WEI S, et al. A novel wave-variable based time-delay compensated four-channel control design for multilateral teleoperation system [J]. IEEE Access, 2018, 13(9):1-7.

- [13] 郝爽. 时变时延条件下遥操作手术系统的控制研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2020.
HAO SH. Study on control of teleoperated surgical system with time-varying delay [D]. Nanchang: Nanchang University, 2020.
- [14] ANNAMRAJU S, PEDIREDLA V K, THONDIYATH A. Lyapunov stable teleoperation controllers using passivity analysis [J]. IFAC-Papers OnLine, 2020, 53 (1): 435-440.
- [15] LI W, GUO J, DING L, et al. Teleoperation of wheeled mobile robot with dynamic longitudinal slippage [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2022, 31(1): 99-113.
- [16] 李佳钰, 尤波, 许家忠, 等. 基于时域无源性控制的六足机器人双边触觉遥操作[J]. 控制与决策, 2020, 35(6): 1345-1352.
LI J Y, YOU B, XU J ZH, et al. Bilateral tactile teleoperation of hexapod robot based on time domain passive control[J]. Control and Decision Making, 2020, 35(6): 1345-1352.
- [17] LI J, YOU B, DING L, et al. Dual-master/single-slave haptic teleoperation system for semiautonomous bilateral control of hexapod robot subject to deformable rough terrain[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2021, 17(6): 8-16.
- [18] 李东方, 杨弘晟, 邓宏彬, 等. 蛇形机器人跟踪误差预测的自适应轨迹跟踪控制器[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(11): 267-278.
LI D F, YANG H SH, DENG H B, et al. Adaptive trajectory tracking controller for snake robot tracking error prediction [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(11): 267-278.
- [19] 倪得晶, 宋爱国, 李会军. 基于虚拟现实的机器人遥操作关键技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(10): 2351-2363.
NI D J, SONG AI G, LI H J. Survey on robot teleoperation based on virtual reality [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38 (10): 2351-2363.
- [20] OGUNRINDE I O, ADETU C F, MOORE J C A, et al. Experimental testing of bandstop wave filter to mitigate wave reflections in bilateral teleoperation[J]. Robotics, 2020, 9(2): 24.
- [21] XING H, TORABI A, DING L, et al. Enhancing kinematic accuracy of redundant wheeled mobile manipulators via adaptive motion planning [J]. Mechatronics, 2021, 79: 102639.
- [22] 庄红超, 高海波, 邓宗全, 等. 电驱动重载六足机器人关节转速分析方法[J]. 机械工程学报, 2013, 49(23): 44-52.
ZHUANG H CH, GAO H B, DENG Z Q, et al. Analysis method of joint rotation speed of driving heavy-duty hexapod robot [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(23): 44-52.
- [23] LI W, LIU Y, DING L, et al. Teleoperation of wheeled mobile robots subject to longitudinal slipping and lateral sliding by time-domain passivity controller [J]. Mechatronics, 2022, 81: 102705.

作者简介



李佳钰, 2009 年于哈尔滨理工大学获得学士学位, 2013 年于哈尔滨理工大学获得硕士学位, 2018 年于哈尔滨理工大学获得博士学位, 现为哈尔滨理工大学副教授, 主要研究方向为足式机器人控制与人机交互技术。
E-mail: lijiayu@hrbust.edu.cn

Li Jiayu received his B. Sc. degree from Harbin University of Science and Technology in 2009, received his M. Sc. degree from Harbin University of Science and Technology in 2013, and received his Ph. D. degree from Harbin University of Science and Technology in 2018. He is currently an associate professor at Harbin University of Science. His main research interests include control of the legged robot and human machine interaction.



尤波 (通信作者), 1982 年于哈尔滨工业大学获得学士学位, 1987 年于哈尔滨科技大学获得硕士学位, 1995 年于哈尔滨工业大学获得博士学位, 现为哈尔滨理工大学教授, 主要研究方向为智能机器人与机电控制。

E-mail: youbo@hrbust.edu.cn

You Bo (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Harbin Institute of Technology in 1982, M. Sc. degree from Harbin University of Science and Technology in 1988, and Ph. D. degree from Harbin Institute of Technology in 1995. He is currently a professor at Harbin University of Science and Technology. His main research interests include intelligent robot and mechatronic control.