

# 控制与决策

Control and Decision

## 接触失效下机器人能量功率受控阻抗控制方法

田新扬, 于晓龙, 许钦桓, 牛建伟, 王薇

引用本文:

田新扬, 于晓龙, 许钦桓, 等. 接触失效下机器人能量功率受控阻抗控制方法[J]. *控制与决策*, 2025, 40(9): 2663–2671.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2024.1256>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### [空间机器人双臂捕获卫星操作的事件采样输出反馈神经网络避撞柔顺控制](#)

Collision avoidance and compliance control based on event sampling output feedback neural network for space robot dual arm capture satellite operation

控制与决策. 2021, 36(9): 2113–2122 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1754>

#### [基于时间延时估计和自适应模糊滑模控制器的双机械臂协同阻抗控制](#)

[Coordinated impedance control for dual-arm robots based on time delay estimation and adaptive fuzzy sliding mode controller](#)

控制与决策. 2021, 36(6): 1311–1323 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1701>

#### [基于未知系统动态估计的机器人预设性能控制](#)

Unknown system dynamics estimator for prescribed performance control of robotic systems

控制与决策. 2021, 36(5): 1040–1048 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1219>

#### [空间机器人捕获航天器操作的避撞柔顺复合自抗扰控制](#)

Collision avoidance and compliant composite active disturbance rejection control of space robot capture spacecraft

控制与决策. 2021, 36(2): 355–362 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0507>

#### [气动人工肌肉驱动的机器人控制方法研究现状概述](#)

Overview of control methods for pneumatic artificial muscle-actuated robots

控制与决策. 2021, 36(1): 27–41 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0793>

# 接触失效下机器人能量功率受控阻抗控制方法

田新扬<sup>1</sup>, 于晓龙<sup>1,2†</sup>, 许钦桓<sup>3</sup>, 牛建伟<sup>1,4</sup>, 王薇<sup>1,2</sup>

- (1. 北京航空航天大学杭州创新研究院 全省工业大数据与机器人智能系统重点实验室, 杭州 311052;  
2. 北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100191;  
3. 北京航天时代光电科技有限公司, 北京 100094; 4. 北京航空航天大学 计算机学院, 北京 100191)

**摘要:** 机器人柔顺控制在物理人机协作中扮演着重要角色, 但环境的不确定性可能影响交互的稳定性, 特别是机器人与环境之间的接触失效可能导致物理冲击行为, 进而造成机器人和任务组件的损坏. 对此, 提出一种能量功率受控的机器人笛卡尔空间阻抗控制方法. 该方法通过缩放控制器刚度和阻尼限制机器人的能量和功率, 并引入能量罐提供能量存储机制, 确保控制器与机器人之间的能量传输符合无源性要求. 在此基础上, 设计功率缩放因子调节能量罐与控制器之间的能量交换速率, 限制控制器流向机器人的功率, 避免因能量罐的快速释放导致系统失稳, 进一步提高机器人执行任务的安全性和控制器的鲁棒性. 基于李雅普诺夫理论严格证明了闭环系统的稳定性, 并通过 Matlab/SimScape 仿真实验验证了所提出控制方法的有效性.

**关键词:** 机器人; 阻抗控制; 接触失效; 能量功率受控; 能量罐; 无源性

**中图分类号:** TP242; TP273 **文献标志码:** A

**DOI:** 10.13195/j.kzyjc.2024.1256

**引用格式:** 田新扬, 于晓龙, 许钦桓, 等. 接触失效下机器人能量功率受控阻抗控制方法 [J]. 控制与决策, 2025, 40(9): 2663-2671.

## Robot impedance control with restricted energy and power under contact loss

TIAN Xin-yang<sup>1</sup>, YU Xiao-long<sup>1,2†</sup>, XU Qin-huan<sup>3</sup>, NIU Jian-wei<sup>1,4</sup>, WANG Wei<sup>1,2</sup>

- (1. Zhejiang Key Laboratory of Industrial Big Data and Robot Intelligent Systems, Hangzhou Innovation of Beihang University, Hangzhou 311052, China; 2. School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China; 3. Beijing Aerospace Times Optoelectronic Technology Co., Ltd, Beijing 100094, China; 4. School of Computer Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** Robot compliance control plays an important role in physical human-robot collaboration. However, the uncertainty of the environment can affect the stability of interaction, especially when contact loss between the robot and the environment occurs, which can lead to physical impact and cause damage to the robot and task components. To address this issue, a Cartesian space impedance controller with restricted energy and power is proposed. This approach enhances safety by adjusting the stiffness and damping of the controller to enforce limits on energy and transmitted power. Meanwhile, the passivity of the controller is ensured by introducing an energy tank, which provides an energy storage mechanism to regulate the energy flow between the controller and the robot. On this basis, a power scaling factor is designed to adjust the energy exchange rate between the energy tank and the controller, limiting the power flow from the controller to the robot. This avoids system instability caused by the rapid release of energy from the tank, thereby further improving the safety and robustness of the robot. The stability of the closed-loop system is rigorously proven based on the Lyapunov theory, and the effectiveness of the proposed controller is verified through Matlab/SimScape simulation experiments.

**Keywords:** robot; impedance control; contact loss; restricted energy and power; energy tank; passivity

## 0 引言

随着机器人应用领域的不断扩展, 越来越多的任务需要机器人与外界环境进行动态交互. 能量交

换是机器人与环境交互的主要作用形式, 即机器人主动向环境施加期望力完成打磨、抛光、齿轮装配等任务, 或环境主动向机器人施加力完成柔顺交互、拖

收稿日期: 2024-10-28; 录用日期: 2025-02-15.

基金项目: 中国博士后科学基金项目 (2024M754072); 长三角科技创新共同体联合攻关重点计划项目 (2024C04056(CSJ)).

†通信作者. E-mail: yxiaolong@buaa.edu.cn.

动示教、力反馈调节等任务<sup>[1-3]</sup>。目前,常见的力控方法分为力位混合控制和阻抗控制两种,其中阻抗控制根据控制输入的不同又分为基于位置的阻抗控制(导纳控制)和基于力的阻抗控制。力位混合控制<sup>[4]</sup>通过解耦的方式分别对正交方向上的力和位置进行精确控制,属于直接法。由于该方法需要已知工作时所需的力和位置轨迹,依赖环境的精准建模,鲁棒性较差。相比而言,阻抗控制<sup>[5]</sup>并不直接控制力或位置,而是通过控制力与位置之间保持一种类似机械阻抗的动态关系,从而使机器人表现出柔顺运动特性,属于间接法。

不管使用上述哪种方法,安全性是保证力控任务顺利执行的首要条件。现有的控制方法普遍关注机器人与作业对象持续接触的恒力控制,如通过自适应阻抗控制在线调整阻抗参数适应非结构化动态环境的不确定性<sup>[6]</sup>;通过时延估计和模糊滑模控制实现双臂协同操作及接触力跟踪<sup>[7]</sup>;通过QP二次规划在线求解最优阻抗参数实现不同刚度人体组织过渡时的恒力跟踪<sup>[8]</sup>。此外,一些研究将强化学习与阻抗控制算法结合,通过学习打磨<sup>[9]</sup>、零件装配<sup>[10]</sup>、螺钉锁付<sup>[11]</sup>等任务的先验知识对阻抗参数进行自适应调整,一定程度上提高了机器人在未知环境和外界干扰下力控算法的稳定性。

然而,当机器人末端工具与作业对象突然脱离接触时,由于机器人与环境之间的物理冲击行为会造成不可逆的损失。一方面,冲击行为会损坏机器人和作业对象本身;另一方面,人机协作场景下由于突然的能量释放可能会对周围的操作人员造成伤害。因此,在线监测和限制控制器被允许注入到机器人的能量和功率是实现安全力控任务的关键。早期的研究通过限制机器人的速度达到能量控制的目的<sup>[12-13]</sup>,机器人在位置控制下根据用户施加的最大能量值来调整参考轨迹,但人机交互性较差。相比之下,使用变阻抗控制是一个较好的解决办法,即通过主动改变刚度和阻尼参数限制机器人的能量和功率。然而,Ferraguti等<sup>[14]</sup>已证明变刚度行为会给系统注入弹性势能,破坏系统的无源性。针对此问题,他们将虚拟能量罐引入到无源性控制器设计中,通过能量罐储存系统耗散来补偿刚度变化所需的能量,进而维持系统的无源性,实现了机器人与时变环境的稳定交互。进一步地,Ferraguti等<sup>[15]</sup>又将该方法扩展到时变导纳控制框架下,设计了具有时变惯性、刚度和阻尼矩阵的导纳控制器,并给出端口-哈密顿系统的形式化描述。此后,能量罐被广泛应用于遥操作主从漂移抑制<sup>[16]</sup>、遥操作主从同步与延时补偿<sup>[17]</sup>、零空

间柔顺控制<sup>[18]</sup>、分层任务控制<sup>[19]</sup>、变阻抗柔顺接触控制<sup>[8]</sup>等,体现出其对于增强系统稳定性,提高控制精度和灵活性的显著能力。

虽然能量罐被频繁运用以维持机器人系统的无源性,但鲜有工作考虑限制能量罐的释放速率以应对任务不确定或不可预见的场景。释放速率过高可能使得系统能量的快速增加,导致机器人在短时间内出现高加速度行为,依然会伴随着系统失稳的风险。为解决该问题,Schindlbeck等<sup>[20]</sup>引入控制器整形函数控制机器人在接触失效后平滑停止运动;Karacan等<sup>[21]</sup>和Shahriari等<sup>[22]</sup>通过设定平衡点偏离因子阻止接触失效下的冲击行为,一旦机器人末端偏离平衡点,机器人便会立即停止运动。然而,这种强制停止机器人运动的方式虽然可以有效限制机器人的位移及运动速度,但仍存在短暂的冲击行为。Shahriari等<sup>[23]</sup>通过定义特定的参考轨迹限制能量罐与系统之间的交换速率,但严重依赖能量轨迹的准确性。此外,Vedove等<sup>[24]</sup>通过定义优化函数调节能量罐与环境的交互速率,但由于QP问题求解计算成本较高,无法保证实时性。

针对上述问题,本文提出一种能量功率受控的机器人笛卡尔空间阻抗控制方法,将机器人与环境交互时产生的能量和功率限制在安全阈值内,保证物理人机交互安全(physical human-robot interaction, pHRI)。在此基础上,解决机器人与环境脱离接触时因能量的瞬间释放而导致的失稳情况。本文具体贡献如下:

- 1) 设计能量功率受控的机器人笛卡尔阻抗控制器,通过缩放控制器刚度和阻尼限制机器人的总能量和总功率;
- 2) 提出接触失效下保证系统持续无源性的“机器人-环境”能量交换速率整定方法,并基于李雅普诺夫理论证明控制器的无源性;
- 3) 考虑机器人力交互应用场景,基于Matlab/SimScape搭建仿真平台进行接触失效实验,充分验证所提出控制器的有效性。

## 1 问题描述

机器人通过阻抗控制与环境交互时,能够根据与环境接触产生的力动态调整自身运动,使得机器人在正常执行任务时与环境之间保持柔性接触,避免过大的冲击或挤压。然而,一旦机器人与环境因非受控因素而导致接触失效,由于缺少能量和功率的限制,机器人会由于惯性对工件及其周围组件造成不可逆破坏,严重情况时还有可能会对周围的操作

人员造成伤害,如图1所示.

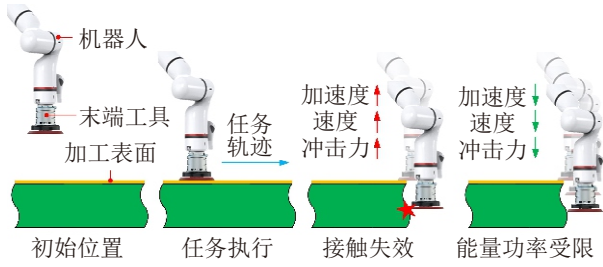


图1 机器人-环境接触失效示意图

具体而言,能量代表机器人与环境交互过程中存储或传递动能和势能的能力,而功率则描述了机器人在单位时间内能量转换的速率,两者都应该被限制在安全阈值之内,以确保任务的绝对安全<sup>[25]</sup>.为此,本文首先分析机器人在阻抗控制时的能量来源,并探讨接触刚度与关节阻尼对系统能量和功率变化的影响;进而,设计刚度矩阵缩放因子限制系统能量,设计阻尼矩阵缩放因子限制系统功率;最后,引入能量罐理论补偿时变阻抗控制器所需的额外能量,并通过设计功率缩放因子限制系统能量变化速率,使得机器人在与环境脱离接触时做出合适的反应.本文所提出算法的核心主要涉及能量功率受控和功率限制两部分,图2为控制算法整体流程.

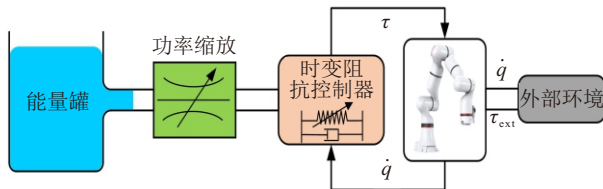


图2 能量功率受控阻抗控制框图

## 2 控制器设计

### 2.1 机器人笛卡尔空间阻抗控制器推导

考虑执行阻抗控制任务的机器人系统,其动力学模型可以表示为

$$\mathbf{V}(\mathbf{x})\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{U}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}})\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{F}_g(\mathbf{x}) = \mathbf{F}_{\text{cart}} + \mathbf{F}_{\text{ext}}. \quad (1)$$

其中:  $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$ ,  $\dot{\mathbf{x}} \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$ ,  $\ddot{\mathbf{x}} \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$  分别为机器人末端的实际位置、实际速度和实际加速度;  $\mathbf{V}(\mathbf{x}) \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ ,  $\mathbf{U}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}) \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ ,  $\mathbf{F}_g(\mathbf{x}) \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$  分别为笛卡尔空间的惯性矩阵、科氏矩阵及重力项;  $\mathbf{F}_{\text{cart}} \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$  为机器人笛卡尔空间阻抗控制力;  $\mathbf{F}_{\text{ext}} \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$  为外部扰动力.

笛卡尔空间阻抗控制的目的是让机器人末端在外力作用下对笛卡尔各个方向呈现出“质量-阻尼-弹簧”的阻抗特性<sup>[5]</sup>,此时期望的闭环系统动力学方程如下:

$$\mathbf{F}_{\text{ext}} = \mathbf{V}_d \ddot{\tilde{\mathbf{x}}} + \mathbf{D}_d \dot{\tilde{\mathbf{x}}} + \mathbf{K}_d \tilde{\mathbf{x}}. \quad (2)$$

其中:  $\mathbf{V}_d, \mathbf{D}_d, \mathbf{K}_d \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$  分别为期望的惯性、阻尼和刚度特性矩阵;  $\tilde{\mathbf{x}}, \dot{\tilde{\mathbf{x}}}, \ddot{\tilde{\mathbf{x}}} \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$  分别为机器人末端实际与期望的位置偏差、速度偏差和加速度偏差,具体可表示为

$$\begin{cases} \tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_d, \\ \dot{\tilde{\mathbf{x}}} = \dot{\mathbf{x}} - \dot{\mathbf{x}}_d, \\ \ddot{\tilde{\mathbf{x}}} = \ddot{\mathbf{x}} - \ddot{\mathbf{x}}_d, \end{cases} \quad (3)$$

这里  $\mathbf{x}_d, \dot{\mathbf{x}}_d, \ddot{\mathbf{x}}_d \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$  分别为机器人末端的期望位置、速度和加速度.

联立式(1)和(3),消掉  $\ddot{\mathbf{x}}$  项,可得

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{\text{cart}} = & \mathbf{V}(\mathbf{x})\ddot{\mathbf{x}}_d + \mathbf{U}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}})\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{F}_g(\mathbf{x}) - \\ & \mathbf{V}(\mathbf{x})\mathbf{V}_d^{-1}(\mathbf{D}_d \dot{\tilde{\mathbf{x}}} + \mathbf{K}_d \tilde{\mathbf{x}}) + \\ & (\mathbf{V}(\mathbf{x})\mathbf{V}_d^{-1} - \mathbf{I})\mathbf{F}_{\text{ext}}. \end{aligned} \quad (4)$$

取  $\mathbf{V}_d = \mathbf{V}(\mathbf{x})$ ,同时在期望闭环行为中考虑相关的离心力和科里奥利力项,  $\mathbf{F}_{\text{cart}}$  可简化为

$$\mathbf{F}_{\text{cart}} = \mathbf{F}_g(\mathbf{x}) + \mathbf{V}(\mathbf{x})\ddot{\mathbf{x}}_d + \mathbf{U}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}})\dot{\mathbf{x}}_d - \mathbf{D}_d \dot{\tilde{\mathbf{x}}} - \mathbf{K}_d \tilde{\mathbf{x}}. \quad (5)$$

将式(5)映射到关节空间,有

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\tau}_{\text{cart}} = & \mathbf{G}(\mathbf{q}) + \mathbf{J}^T(\mathbf{V}(\mathbf{x})\ddot{\mathbf{x}}_d + \mathbf{U}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}})\dot{\mathbf{x}}_d - \\ & \mathbf{D}_d \dot{\tilde{\mathbf{x}}} - \mathbf{K}_d \tilde{\mathbf{x}}). \end{aligned} \quad (6)$$

其中:  $\boldsymbol{\tau}_{\text{cart}}$  为关节空间控制力矩,  $\mathbf{G}(\mathbf{q})$  为关节空间重力项,  $\mathbf{J}$  为机器人的雅可比矩阵.

联立式(1)、(5)并代入(2)中,可得系统的期望闭环行为为满足如下阻抗特性:

$$\mathbf{V}(\mathbf{x})\ddot{\tilde{\mathbf{x}}} + \mathbf{U}(\mathbf{x}, \dot{\tilde{\mathbf{x}}})\dot{\tilde{\mathbf{x}}} + \mathbf{D}_d \dot{\tilde{\mathbf{x}}} + \mathbf{K}_d \tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{F}_{\text{ext}}. \quad (7)$$

### 2.2 能量和功率整定

机器人在执行诸如打磨抛光、焊接涂装等平面作业任务时,其总能量包括因运动产生的动能  $T_{\text{tot}}$  及与作业对象交互产生的弹性势能  $U_{\text{tot}}$ ,即

$$E_{\text{tot}} = U_{\text{tot}} + T_{\text{tot}}. \quad (8)$$

其中:  $U_{\text{tot}}$  和  $T_{\text{tot}}$  的具体表达式<sup>[26]</sup>为

$$\begin{cases} T_{\text{tot}} = \frac{1}{2} \dot{\tilde{\mathbf{x}}}^T \mathbf{V}(\mathbf{x}) \dot{\tilde{\mathbf{x}}}, \\ U_{\text{tot}} = \frac{1}{2} \tilde{\mathbf{x}}^T \mathbf{K}_d \tilde{\mathbf{x}}. \end{cases} \quad (9)$$

机器人的动能为自身属性,无法通过外部手段改变,而弹性势能可以通过调节控制器的刚度进行控制,因此通过缩放刚度限制机器人的总能量,有

$$\lambda(t) = \begin{cases} 1, & E_{\text{tot}} \leq E_{\text{max}}; \\ \frac{E_{\text{max}} - T_{\text{tot}}}{U_{\text{tot}}}, & E_{\text{tot}} > E_{\text{max}}. \end{cases} \quad (10)$$

其中:  $\lambda(t)$  为刚度缩放因子,  $E_{\text{max}}$  为机器人所允许的

最大能量. 则机器人总能量可以被改写为

$$E_{\text{tot}} = T_{\text{tot}} + \lambda(t) \cdot U_{\text{tot}}. \quad (11)$$

由于 $U_{\text{tot}}$ 正比于笛卡尔空间刚度特性矩阵, 修正后的刚度矩阵 $\mathbf{K}_d^\dagger$ 可表示为

$$\mathbf{K}_d^\dagger = \lambda(t) \cdot \mathbf{K}_d. \quad (12)$$

另一方面, 机器人由运动产生的总功率 $P_{\text{motion}}$ 可表示为

$$P_{\text{motion}} = - \underbrace{\tilde{\mathbf{x}}^T \mathbf{K}_d^\dagger \dot{\tilde{\mathbf{x}}}}_{P_{\text{task}}} - \underbrace{\dot{\tilde{\mathbf{x}}}^T \mathbf{D}_d \dot{\tilde{\mathbf{x}}}}_{P_{\text{diss}}}. \quad (13)$$

其中:  $P_{\text{task}}$ 为机器人与环境交互的功率,  $P_{\text{diss}}$ 为系统耗散功率.

由于功率描述机器人与环境接触时传递的瞬时能量, 设计阻尼缩放因子限制 $P_{\text{motion}}$ 为

$$\beta(t) = \begin{cases} 1, & P_{\text{motion}} \leq P_{\text{max}}; \\ \frac{-\tilde{\mathbf{x}}^T \mathbf{K}_d^\dagger \dot{\tilde{\mathbf{x}}} - P_{\text{max}}}{\dot{\tilde{\mathbf{x}}}^T \mathbf{D}_d \dot{\tilde{\mathbf{x}}}}, & P_{\text{motion}} > P_{\text{max}}. \end{cases} \quad (14)$$

其中:  $\beta(t)$ 为阻尼缩放因子,  $P_{\text{max}}$ 为阻抗控制器允许向机器人传递的最大功率. 则修正后的阻尼矩阵 $\mathbf{D}_d^\dagger$ 可表示为

$$\mathbf{D}_d^\dagger = \beta(t) \cdot \mathbf{D}_d. \quad (15)$$

最终, 能量功率受控的笛卡尔阻抗控制器可表示为

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\tau}_{\text{cart}} = & \mathbf{G}(\mathbf{q}) + \mathbf{J}^T(\mathbf{V}(\mathbf{x}))\ddot{\mathbf{x}}_d + \mathbf{U}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}})\dot{\mathbf{x}}_d - \\ & \beta(t)\mathbf{D}_d\dot{\tilde{\mathbf{x}}} - \lambda(t)\mathbf{K}_d\tilde{\mathbf{x}}. \end{aligned} \quad (16)$$

### 3 速率整定设计与稳定性分析

#### 3.1 机器人系统的无源性

从能量的角度出发对机器人这类非线性系统进行稳定性分析是常用的手段. 给出由状态模型定义的动力学系统

$$\begin{aligned} S: & \begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}), \\ \mathbf{y} = \mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{u}), \end{cases} \\ & \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0 \in R^n. \end{aligned} \quad (17)$$

其中:  $\mathbf{x} \in R^n$ ,  $\mathbf{u}: [0, \sigma] \in R^n$ 为系统输入,  $\mathbf{y} \in R^n$ 为系统输出. 当且仅当存在存储函数 $H(\mathbf{x}): R^n \rightarrow R \geq 0$ 时, 有

$$H[\mathbf{x}(\sigma)] \leq H[\mathbf{x}(0)] + \int_0^\sigma w(\mathbf{u}(\tau), \mathbf{y}(\tau))d\tau. \quad (18)$$

则系统 $S$ 相对于供给率 $w(\mathbf{u}, \mathbf{y})$ 是耗散的. 特别地, 当供给率满足

$$w(\mathbf{u}, \mathbf{y}) = \mathbf{u}^T \mathbf{y} \quad (19)$$

时,  $S$ 是严格无源的. 显然, 无源性是耗散性的特例. 更具体地讲, 对于系统 $S$ , 如果存在连续可微半正定存储函数 $H(x)$ 满足

$$\mathbf{u}^T \mathbf{y} \geq \dot{H} = \frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}), \quad (20)$$

则 $S$ 是无源的<sup>[27]</sup>. 式(20)可进一步写成

$$H[\mathbf{x}(\sigma)] - H[\mathbf{x}(0)] \leq \int_0^\sigma \mathbf{u}^T \mathbf{y} dt. \quad (21)$$

式(21)表明, 系统能量总和总是小于外部注入能量总和, 即系统运动总是伴随着能量损失,  $\mathbf{u}^T \mathbf{y}$ 可解释为伴随着输入 $\mathbf{u}$ 由外部注入到系统的能量供给率.

根据无源性理论的定义, 为满足式(7)的机器人系统设计一个合适的储能函数

$$S_{\text{cart}} = \frac{1}{2} \dot{\tilde{\mathbf{x}}}^T \mathbf{V}(\mathbf{x}) \dot{\tilde{\mathbf{x}}} + \frac{1}{2} \tilde{\mathbf{x}}^T \mathbf{K}_d \tilde{\mathbf{x}}. \quad (22)$$

其中:  $\frac{1}{2} \dot{\tilde{\mathbf{x}}}^T \mathbf{V}(\mathbf{x}) \dot{\tilde{\mathbf{x}}}$ 为系统动能,  $\frac{1}{2} \tilde{\mathbf{x}}^T \mathbf{K}_d \tilde{\mathbf{x}}$ 为系统弹性势能. 对于任意非零向量 $\mathbf{x}$ , 满足 $S_{\text{cart}} > 0$ 正定.

$S_{\text{cart}}$ 对时间的一阶导数为

$$\begin{aligned} \dot{S}_{\text{cart}} = & \dot{\tilde{\mathbf{x}}}^T \mathbf{V}(\mathbf{x}) \ddot{\tilde{\mathbf{x}}} + \frac{1}{2} \dot{\tilde{\mathbf{x}}}^T \dot{\mathbf{V}}(\mathbf{x}) \dot{\tilde{\mathbf{x}}} + \dot{\tilde{\mathbf{x}}}^T \mathbf{K}_d \tilde{\mathbf{x}} = \\ & - \dot{\tilde{\mathbf{x}}}^T [(\mathbf{U}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}) + \mathbf{D}_d) \dot{\tilde{\mathbf{x}}} + \mathbf{K}_d \tilde{\mathbf{x}} - \mathbf{F}_{\text{ext}}] + \\ & \frac{1}{2} \dot{\tilde{\mathbf{x}}}^T \dot{\mathbf{V}}(\mathbf{x}) \dot{\tilde{\mathbf{x}}} + \dot{\tilde{\mathbf{x}}}^T \mathbf{K}_d \tilde{\mathbf{x}} = \\ & - \dot{\tilde{\mathbf{x}}}^T \mathbf{D}_d \dot{\tilde{\mathbf{x}}} + \dot{\tilde{\mathbf{x}}}^T \mathbf{F}_{\text{ext}} + \frac{1}{2} \dot{\tilde{\mathbf{x}}}^T (\dot{\mathbf{V}}(\mathbf{x}) - 2\mathbf{U}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}})) \dot{\tilde{\mathbf{x}}} = \\ & - \dot{\tilde{\mathbf{x}}}^T \mathbf{D}_d \dot{\tilde{\mathbf{x}}} + \dot{\tilde{\mathbf{x}}}^T \mathbf{F}_{\text{ext}} \leq \dot{\tilde{\mathbf{x}}}^T \mathbf{F}_{\text{ext}}, \end{aligned} \quad (23)$$

其中 $\dot{\mathbf{V}}(\mathbf{x}) - 2\mathbf{U}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}})$ 为反对称矩阵, 满足 $\dot{\tilde{\mathbf{x}}}^T (\dot{\mathbf{V}}(\mathbf{x}) - 2\mathbf{U}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}})) \dot{\tilde{\mathbf{x}}} = 0$ .

式(23)满足(21)约束的被动性条件为

$$S[\mathbf{x}(\sigma)] - S[\mathbf{x}(0)] \leq \int_0^\sigma \dot{\tilde{\mathbf{x}}}^T \mathbf{F}_{\text{ext}} dt. \quad (24)$$

式(24)表明, 被动性确保了系统在自由运动与环境交互时的稳定行为.

#### 3.2 能量罐设计与稳定性分析

由2.2节可知, 修正后的阻抗控制器引入了时变项 $\lambda(t)$ , 则时变阻抗控制器的储能函数 $S_{\text{cart}}^\dagger$ 可表示为

$$\begin{aligned} S_{\text{cart}}^\dagger = & \frac{1}{2} \dot{\tilde{\mathbf{x}}}^T \mathbf{V}(\mathbf{x}) \dot{\tilde{\mathbf{x}}} + \frac{1}{2} \lambda(t) \tilde{\mathbf{x}}^T \mathbf{K}_d \tilde{\mathbf{x}} = \\ & T_{\text{tot}} + \lambda(t) U_{\text{tot}}. \end{aligned} \quad (25)$$

此时,  $S_{\text{cart}}^\dagger$ 对应的一阶导数可表示为

$$\dot{S}_{\text{cart}}^\dagger = \dot{T}_{\text{tot}} + \lambda(t) \dot{U}_{\text{tot}} + \dot{\lambda}(t) U_{\text{tot}}. \quad (26)$$

由式(8)和(9)可知

$$\begin{aligned} \dot{\lambda}(t) = & \begin{cases} 0, & E_{\text{tot}} \leq E_{\text{max}}; \\ \frac{-\dot{T}_{\text{tot}} U_{\text{tot}} - (E_{\text{max}} - T_{\text{tot}}) \dot{U}_{\text{tot}}}{U_{\text{tot}}^2}, & E_{\text{tot}} > E_{\text{max}}. \end{cases} \end{aligned} \quad (27)$$

$$\dot{U}_{tot} = \dot{\mathbf{x}}^T \mathbf{K}_d \tilde{\mathbf{x}}. \quad (28)$$

则式(26)可进一步表示为

$$\begin{aligned} \dot{S}_{cart}^\dagger &= \dot{T}_{tot} + \lambda(t) \dot{\mathbf{x}}^T \mathbf{K}_d \tilde{\mathbf{x}} + \\ &\frac{-\dot{T}_{tot} U_{tot} - (E_{max} - T_{tot}) \dot{U}_{tot}}{U_{tot}^2} \cdot U_{tot} \leq \\ &-\lambda(t) \dot{U}_{tot} + \dot{\mathbf{x}}^T \mathbf{F}_{ext}. \end{aligned} \quad (29)$$

由于 $-\lambda(t)\dot{U}_{tot}$ 的符号不确定,无法保证系统的无源性.式(30)表明,时变阻抗控制器通过操纵系统能量会违反系统无源性,造成系统存在潜在的失稳情况,因此有必要限制控制器允许注入系统的能量.为解决此问题,本文通过引入一个虚拟的能量罐补偿阻抗控制器所需的额外能量,并通过设计功率缩放因子限制能量罐内能量的释放速率,保证系统的持续稳定.

将式(28)代入(29),有

$$\begin{aligned} \dot{S}_{cart}^\dagger &\leq -\lambda(t) \dot{\mathbf{x}}^T \mathbf{K}_d \tilde{\mathbf{x}} + \dot{\mathbf{x}}^T \mathbf{F}_{ext} \leq \\ &-\lambda(t) (\dot{\mathbf{x}} - \dot{\mathbf{x}}_d)^T \mathbf{K}_d \tilde{\mathbf{x}} + \dot{\mathbf{x}}^T \mathbf{F}_{ext} \leq \\ &-P_{task}^\dagger + \mathbf{x}_d^T \mathbf{K}_d \tilde{\mathbf{x}} + \dot{\mathbf{x}}^T \mathbf{F}_{ext}, \end{aligned} \quad (30)$$

其中 $P_{task}^\dagger = \lambda(t) \dot{\mathbf{x}}^T \mathbf{K}_d \tilde{\mathbf{x}}$ 为修正后的 $P_{task}$ .

考虑控制器本身,忽略与期望运动直接相关的功率,则式(30)可进一步改写为

$$\dot{S}_{cart}^\dagger \leq -P_{task}^\dagger + \dot{\mathbf{x}}^T \mathbf{F}_{ext}. \quad (31)$$

设计能量罐 $E_{tank}$ 关联系统任务功率端口 $\dot{E}_{tank} = P_{task}^\dagger$ ,同时为防止奇异 $E_{tank}$ 需要一定初始能量值 $\underline{E}_{tank}$ ,且为其设置一个上限 $\bar{E}_{tank}$ 防止能量无限叠加,则设计的能量罐可表示为

$$\dot{E}_{tank} = \begin{cases} \alpha P_{task}^\dagger, & P_{task}^\dagger \leq 0; \\ \gamma P_{task}^\dagger, & P_{task}^\dagger > 0. \end{cases} \quad (32)$$

其中: $\alpha$ 和 $\gamma$ 分别为

$$\alpha = \begin{cases} 0, & P_{task}^\dagger \leq 0 \wedge E_{tank} < \underline{E}_{tank}; \\ \frac{1}{2} \left[ 1 - \cos \left( \frac{E_{tank} - \underline{E}_{tank}}{\delta_E} \pi \right) \right], & \underline{E}_{tank} \leq E_{tank} < \underline{E}_{tank} + \delta_E; \\ 1, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (33)$$

$$\gamma = \begin{cases} 0, & P_{task}^\dagger > 0 \wedge E_{tank} > \bar{E}_{tank}; \\ 1, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (34)$$

$\delta_E$ 为能量罐下限阈值,随着 $E_{tank}$ 从 $\underline{E}_{tank} + \delta_E$ 降低到 $\underline{E}_{tank}$ ;  $\alpha$ 按照余弦函数从1平滑过渡到0.则结合能量罐后的系统储能函数对时间的一阶导数变为

$$\dot{S}_{cart}^\dagger \leq -\dot{E}_{tank} + \dot{\mathbf{x}}^T \mathbf{F}_{ext}, \quad (35)$$

即

$$\dot{S}_{cart}^\dagger + \dot{E}_{tank} \leq \dot{\mathbf{x}}^T \mathbf{F}_{ext}. \quad (36)$$

定义 $W$ 为时变阻抗控制器结合能量罐的总能量函数,则式(36)满足式(19)约束的被动性条件为

$$W[\mathbf{x}(\sigma)] - W[\mathbf{x}(0)] \leq \int_0^\sigma \dot{\mathbf{x}}^T \mathbf{F}_{ext} dt. \quad (37)$$

式(37)表明,系统在能量罐的干预下是无源的.

### 3.3 功率整定因子设计

能量罐可以有效控制时变阻抗控制器潜在的发散行为,但无法控制发散的速率,因此设计功率整定因子 $\eta$ 进一步限制能量罐的能量释放速率,有

$$\eta = \begin{cases} \frac{P_{low}}{P_{task}^\dagger}, & P_{task}^\dagger \leq P_{low} \leq 0; \\ 1, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (38)$$

其中 $P_{low}$ 为任务所允许的最大提取功率.则修正后的能量罐可表示为

$$\dot{E}_{tank}^\dagger = \begin{cases} \eta \alpha P_{task}^\dagger, & P_{task}^\dagger \leq 0; \\ \gamma P_{task}^\dagger, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (39)$$

相应地,刚度缩放因子 $\lambda(t)$ 重新调整为

$$\lambda(t) = \begin{cases} 1, & E_{tot} \leq E_{max} \wedge \alpha \neq 0; \\ \lambda(t-1), & \alpha = 0 \wedge P_{task}^\dagger \neq 0; \\ \frac{E_{max} - T_{tot}}{U_{tot}}, & E_{tot} > E_{max}. \end{cases} \quad (40)$$

式(40)表明,当能量罐的能量低于所允许的最低值时,时变阻抗控制器的阻抗参数将保持恒定,即变为标准的笛卡尔阻抗控制器,且保证控制器的能量和功率依然被限制在安全阈值之内.能量罐对应的计算过程伪代码如下所示.

算法1 能量罐计算过程.

1. 输入:  $\lambda, \dot{\mathbf{x}}, \tilde{\mathbf{x}}, \Delta t$ ;
2. 输出: updated tank state  $E_{tank}(t)$  after each iteration.
3. initialize:  $E_{tank\_init}, E_{tank\_max}, E_{tank\_min}, P_{task\_min}, \delta_E$
4. while: Optimization loop is active do
5.  $P_{task}^\dagger = \lambda \dot{\mathbf{x}}^T \mathbf{K}_d \tilde{\mathbf{x}}$
6. calculate  $\alpha, \gamma, \eta$  according to 式(33)、(34)、(38)
7. if  $P_{task}^\dagger < 0$  then
8.  $\dot{E}_{tank}^\dagger(t) = \eta \alpha P_{task}^\dagger$
9. else
10.  $\dot{E}_{tank}^\dagger(t) = \gamma P_{task}^\dagger$
11. end if
12.  $E_{tank}(t) = E_{tank}^\dagger(t-1) + \dot{E}_{tank}^\dagger(t) \Delta t$
13. end while

## 4 仿真分析

为验证本文所提出的能量功率受控阻抗控制器的有效性及性能,基于 Matlab/Simscape 搭建机器人仿真模型进行仿真,并与标准笛卡尔空间阻抗控制

器进行对比分析.

4.1 仿真环境搭建

图3为搭建的机器人模型仿真平台, 主要包括七自由度机器人机械模型、轨迹规划模块、阻抗控制模块、外部扰动力模块和信息输出模块. 其中: 轨迹规划模块采用5次多项式生成期望关节变量; 机器人机械模型采用珞石 Xmate3 Pro 机器人的 URDF

文件导入 Matlab 中生成的 SimScape Multibody 模型, 且设定各关节的控制输入为目标控制力矩; 阻抗控制模块按照式 (6) 和 (16) 写入; 外部扰动力模块按照  $\tau_{ext} = J^T F_{ext}$  写入; 信息输出模块负责输出机器人总能量  $E_{tot}$ 、总功率  $P_{motion}$ 、能量罐能量  $E_{tank}$ 、功率整定因子  $\eta$ 、刚度缩放因子  $\lambda(t)$ 、阻尼缩放因子  $\beta(t)$  等参数的变化情况.

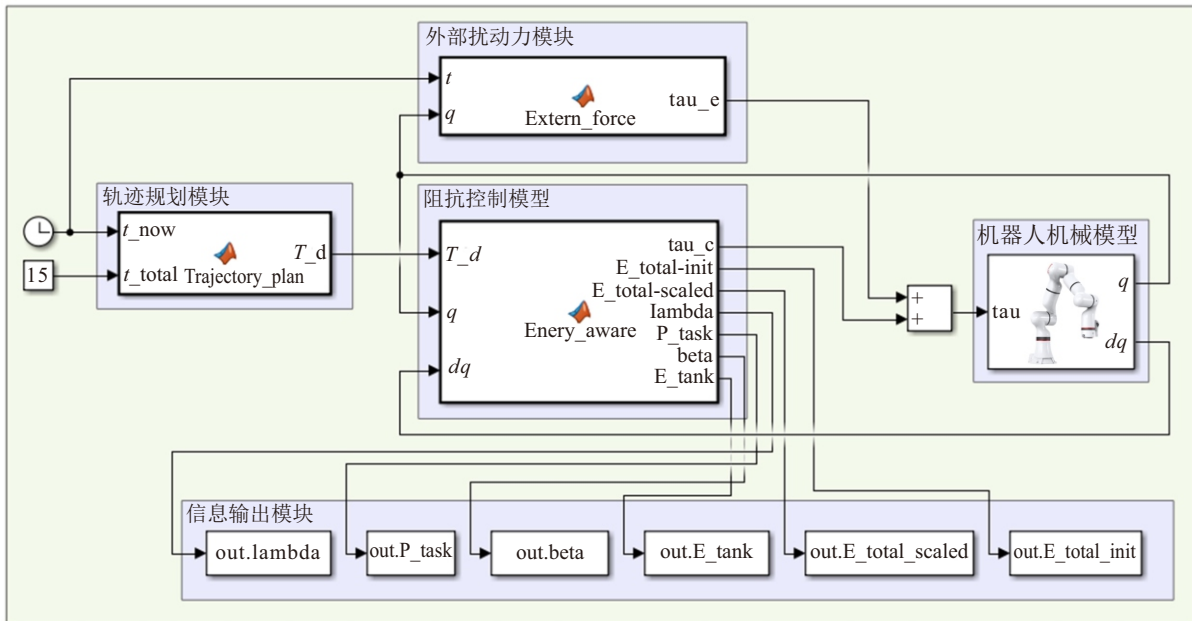


图3 机器人仿真控制平台

4.2 接触失效冲击行为对比

仿真过程模拟机器人在阻抗模式下脱离接触后的运动情况. 如图4所示, 在 0~10 s, 机器人在阻抗模式下从初始位置 [0.36 0 0.485 2] m 试图运动到 [0.6 0 0.3] m, 由于平板的存在, 机器人末端在与平板接触时 Z 向位移保持不变, 而 X 向在高刚度下仍继续跟踪期望轨迹, 直到与平板失去接触, 最后到达目标位置. 此后, 在 10~12 s 期间通过外部扰动力模块向机器人末端 Y 正向施加外部力, 模拟人机交互过程.

互过程.

仿真时, 机器人分别在标准笛卡尔阻抗控制器和能量功率受控的笛卡尔阻抗控制器下完成预期运动. 为定量分析两种控制器效果, 机器人的笛卡尔阻抗参数均设为一致, 而最大能量、最大功率及能量罐等参数根据经验给出, 具体参数如表1~表3所示.

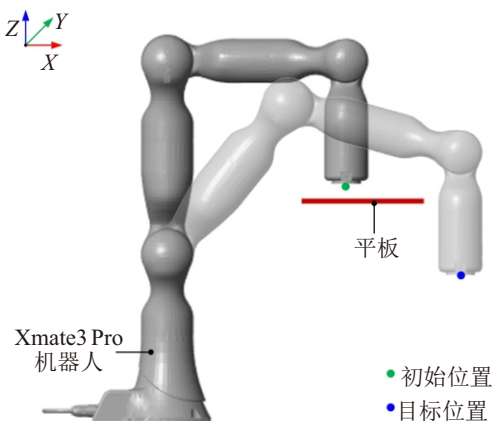


图4 仿真模型可视化

表1 标准笛卡尔阻抗控制器参数

参数	数值
笛卡尔空间刚度 $K_d$	[900 900 900 150 150 150]
笛卡尔空间阻尼 $D_d$	[60 60 60 24 24 24]

表2 能量功率受控的笛卡尔阻抗控制参数

参数	数值
笛卡尔空间刚度 $K_d$	[900 900 900 150 150 150]
笛卡尔空间阻尼 $D_d$	[60 60 60 24 24 24]
最大允许功率 $P_{motion\_max}/W$	0.5
最大允许能量 $E_{tot\_max}/J$	0.3

首先分析机器人的能量变化. 在平板位移阶段, 随着机器人 Z 向与目标位置逐渐偏离, 机器人势能逐渐增大, 在约 5.6 s 时总能量达到允许能量阈值,

表3 能量罐及其他参数设置

参数	数值
最大允许提取功率 $P_{\text{tank\_low}}/\text{W}$	-0.25
最大允许能量 $E_{\text{tank\_max}}/\text{J}$	5
最低允许能量 $E_{\text{tank\_min}}/\text{J}$	0.2
过渡阈值 $\delta_E/\text{J}$	0.05
初始能量 $E_{\text{tank\_init}}/\text{J}$	3
平板刚度 $K_b/(\text{N/m})$	1000
Y向外部扰动力 $F_{\text{ext}}/\text{N}$	$50 \sin(\pi(t-10)/2)$

如图5绿线所示. 此时在能量缩放因子  $\lambda(t)$  的影响下, 机器人通过降低刚度保证总能量不超过允许能量阈值, 如图6蓝线所示.

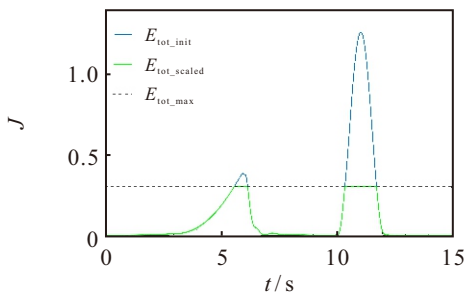


图5 机器人总能量变化

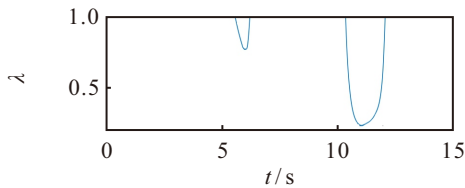


图6  $\lambda(t)$ 变化

图7给出了能量罐的储能变化. 在自由运动阶段,  $P_{\text{task}}$  随机器人运动速度增大逐渐增大, 能量罐能量开始减少, 在第3s时与平板接触; 在平板位移阶段, 为防止时变刚度破坏系统稳定性, 需要从能量罐中提取能量注入机器人系统, 能量罐的储能继续减少. 当机器人与平板失去接触后, 传统笛卡尔控制在Z向阻抗力的作用下会迅速逼近目标位置, 而能量功率受控阻抗控制器在  $\eta$  的影响下会限制能量罐注入机器人的速率, 防止能量抽取过快. 从图8可以看出, 能量罐抽取速率始终被限制在最大允许提取功率阈值  $P_{\text{tank\_low}}$  之内.

在10~12s期间, 机器人因受到外部扰动力干扰而偏离平衡位置,  $P_{\text{task}}$  增大, 能量罐储能增加. 与此同时, 机器人势能增大, 能量缩放因子  $\lambda(t)$  再次生效防止机器人总能量超过能量阈值. 此外, 在阻尼缩放因子  $\beta(t)$  的影响下, 机器人的运动功率同样被限制在允许功率阈值之内, 如图9~图11所示.

图12和图13显示了机器人末端在接触失效和

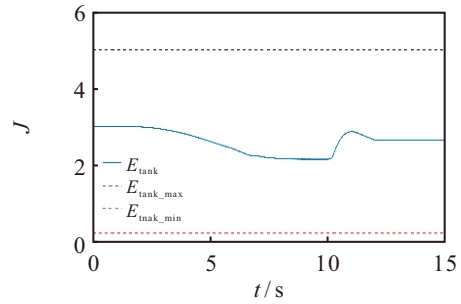


图7 能量罐储能变化

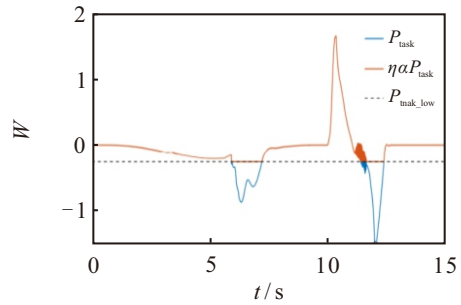


图8 能量罐提取功率变化

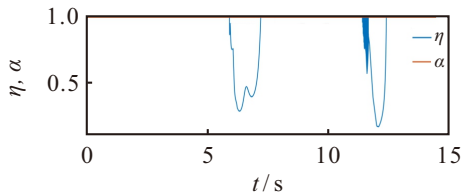


图9  $\eta$ 和 $\alpha$ 变化

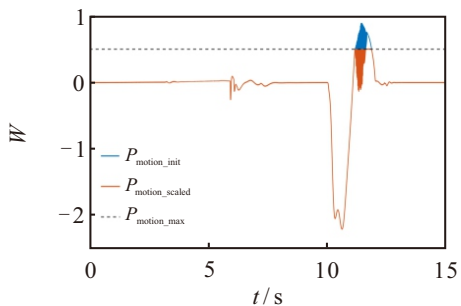


图10 机器人总功率变化

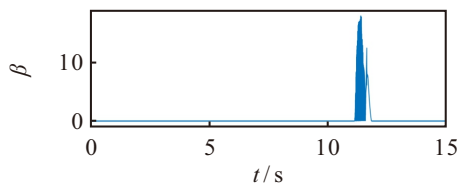


图11  $\beta(t)$ 变化

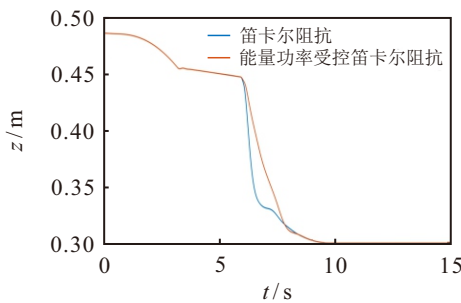


图12 机器人末端 Z 向位移变化

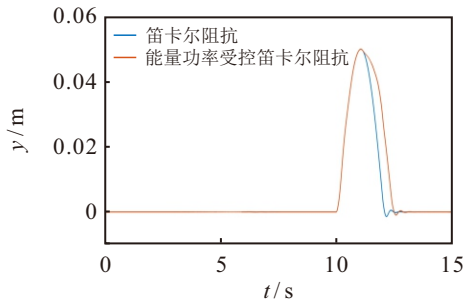


图13 机器人末端 Y 向位移变化

外力干扰下的位移变化情况。结果表明,功率缩放因子 $\eta$ 使得机器人在 Z 向和 Y 向的位移变化更为缓慢,这也从侧面验证了本文提出的能量功率受控阻抗控制器的有效性。

为进一步验证算法的实时性能,在实时 Linux 系统上进行测试。测试平台采用稳信精灵系列工控机,内部配置 Intel 12th Core i5 处理器,1.7 GHz 主频,8 GB 内存,运行集成 Preempt-RT 的 ubuntu22.04 实时系统。测试时,使用 C++编写程序代码,循环执行 100 000 次,结果如表 4 所示。从表 4 可以看出,由于变阻抗和能量罐仅涉及矩阵乘法及基本的线性运算,计算时间与传统笛卡尔阻抗控制相近,最大耗时 403  $\mu$ s,平均耗时 259  $\mu$ s,满足 1 kHz 实时控制要求。

表4 算法计算时间对比

阻抗算法	标准笛卡尔阻抗控制		能量功率受限笛卡尔阻抗控制	
	最大值	平均值	最大值	平均值
计算时间/ $\mu$ s	357	232	403	259

## 5 结论

本文从控制机器人能量和功率的角度出发,针对机器人执行力控任务时出现的接触失效现象提出了一种能量功率受控的机器人笛卡尔阻抗控制方法。该方法通过缩放刚度和阻尼限制机器人的能量和传递功率,并引入具备功率调节功能的能量罐保证时变阻抗控制器的持续无源。实验结果表明,在机器人与环境丢失接触的情况下可以保证自身的能量和传递的功率不超过阈值,从而减少机器人与环境之间的冲击,同时维持系统的稳定性。在 pHRI 期间,能量缩放因子和功率缩放因子可以限制机器人传递的能量和功率,保证人机交互安全。未来的工作将会把算法部署到自研的机器人运动控制器上,并结合具备关节力控的机器人进行样机实验。

## 参考文献 (References)

[1] Hentout A, Aouache M, Maoudj A, et al. Human-robot interaction in industrial collaborative robotics: A

literature review of the decade 2008-2017[J]. *Advanced Robotics*, 2019, 33(15/16): 764-799.

- [2] Villani V, Pini F, Leali F, et al. Survey on human-robot collaboration in industrial settings: Safety, intuitive interfaces and applications[J]. *Mechatronics*, 2018, 55: 248-266.
- [3] 姚勇, 丁力, 马瑞, 等. 考虑关节柔性的绳驱动空中机械臂关节空间鲁棒控制[J]. *控制与决策*, 2023, 38(4): 971-979.  
(Yao Y, Ding L, Ma R, et al. Robust control for a cable-driven aerial manipulator with joint flexibility in joint space[J]. *Control and Decision*, 2023, 38(4): 971-979.)
- [4] Raibert M H, Craig J J. Hybrid position/force control of manipulators[J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 1981, 103(2): 126-133.
- [5] Hogan N. Impedance control: An approach to manipulators: Part I-theory, Part II-implementation, Part III-applications[J]. *Journal of dynamics systems, Measurement, and Control*, 1985, 107: 1-24.
- [6] 甘亚辉, 段晋军, 戴先中. 非结构环境下的机器人自适应变阻抗力跟踪控制方法[J]. *控制与决策*, 2019, 34(10): 2134-2142.  
(Gan Y H, Duan J J, Dai X Z. Adaptive variable impedance control for robot force tracking in unstructured environment[J]. *Control and Decision*, 2019, 34(10): 2134-2142.)
- [7] 李德昀, 徐德刚, 桂卫华. 基于时间延时估计和自适应模糊滑模控制器的双机械臂协同阻抗控制[J]. *控制与决策*, 2021, 36(6): 1311-1323.  
(Li D Y, Xu D G, Gui W H. Coordinated impedance control for dual-arm robots based on time delay estimation and adaptive fuzzy sliding mode controller[J]. *Control and Decision*, 2021, 36(6): 1311-1323.)
- [8] Fu J L, Burzo I, Iovene E, et al. Optimization-based variable impedance control of robotic manipulator for medical contact tasks[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2024, 73: 4004608.
- [9] Zhang T, Xiao M, Zou Y B, et al. Robotic curved surface tracking with a neural network for angle identification and constant force control based on reinforcement learning[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2020, 21(5): 869-882.
- [10] 宋锐, 李凤鸣, 权威, 等. 多约束条件下机器人柔性装配技能自学习[J]. *控制与决策*, 2022, 37(5): 1329-1337.  
(Song R, Li F M, Quan W, et al. Flexible assembly skill self-learning of robot under multiple constraints[J]. *Control and Decision*, 2022, 37(5): 1329-1337.)
- [11] Peng Y Q, Li W D, Liang Y C, et al. Robotic disassembly of screws for end-of-life product remanufacturing enabled by deep reinforcement learning[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 439: 140863.
- [12] Laffranchi M, Tsagarakis N G, Caldwell D G. Safe human robot interaction via energy regulation control[C]. 2009 IEEE/RSJ International Conference on

- Intelligent Robots and Systems. Louis, 2009: 35-41.
- [13] Tadele T S, de Vries T, Stramigioli S. The safety of domestic robotics: A survey of various safety-related publications[J]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2014, 21(3): 134-142.
- [14] Ferraguti F, Secchi C, Fantuzzi C. A tank-based approach to impedance control with variable stiffness[C]. 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Karlsruhe, 2013: 4948-4953.
- [15] Ferraguti F, Preda N, Manurung A, et al. An energy tank-based interactive control architecture for autonomous and teleoperated robotic surgery[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2015, 31(5): 1073-1088.
- [16] Minelli M, Ferraguti F, Piccinelli N, et al. An energy-shared two-layer approach for multi-master-multi-slave bilateral teleoperation systems[C]. International Conference on Robotics and Automation. Montreal, 2019: 423-429.
- [17] 唐语杉. 端口有源双边遥操作系统的分析与设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2022.  
(Tang Y S. Analysis and design of port active bilateral teleoperation system[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2022.)
- [18] Dietrich A, Ott C, Stramigioli S. Passivation of projection-based null space compliance control via energy tanks[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2016, 1(1): 184-191.
- [19] Dietrich A, Wu X W, Bussmann K, et al. Passive hierarchical impedance control via energy tanks[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2017, 2(2): 522-529.
- [20] Schindlbeck C, Haddadin S. Unified passivity-based Cartesian force/impedance control for rigid and flexible joint robots *via* task-energy tanks[C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Seattle, 2015: 440-447.
- [21] Karacan K, Sadeghian H, Kirschner R, et al. Passivity-based skill motion learning in stiffness-adaptive unified force-impedance control[C]. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Kyoto, 2022: 9604-9611.
- [22] Shahriari E, Ali Baradaran Birjandi S, Haddadin S. Passivity-based adaptive force-impedance control for modular multi-manual object manipulation[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2022, 7(2): 2194-2201.
- [23] Shahriari E, Johannsmeier L, Jensen E, et al. Power flow regulation, adaptation, and learning for intrinsically robust virtual energy tanks[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2020, 5(1): 211-218.
- [24] Vedove M D, Lamon E, Fontanelli D, et al. A passivity-based variable impedance controller for incremental learning of periodic interactive tasks[C]. 2024 IEEE 20th International Conference on Automation Science and Engineering. Bari, 2024: 2604-2609.
- [25] International organization for standardization[Z]. 2016.
- [26] Stramigioli S. Modeling and IPC control of interactive mechanical systems: A coordinate-free approach[M]. London: Springer, 2001.
- [27] Hatanaka T, Chopra N, Fujita M, et al. Passivity-based control and estimation in networked robotics[M]. Cham: Springer International Publishing, 2015.

## 作者简介

田新扬 (1994-), 男, 博士后, 主要研究方向为机器人阻抗控制、物理人机协作, E-mail: [tianers@buaa.edu.cn](mailto:tianers@buaa.edu.cn);

于晓龙 (1990-), 男, 副研究员, 硕士, 主要研究方向为移动机器人智能感知规划、力反馈遥操作, E-mail: [yxiaolong@buaa.edu.cn](mailto:yxiaolong@buaa.edu.cn);

许钦桓 (1990-), 男, 高级工程师, 博士, 主要研究方向为机器运动规划、运动仿真及拟人机械臂技术, E-mail: [xuqinhuan@buaa.edu.cn](mailto:xuqinhuan@buaa.edu.cn);

牛建伟 (1969-), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要研究方向为计算机视觉、大数据分析与自然语言处理技术、智能机器人操作系统, E-mail: [niujianwei@buaa.edu.cn](mailto:niujianwei@buaa.edu.cn);

王薇 (1983-), 女, 教授, 博士, 博士生导师, 主要研究方向为先进控制与人工智能、智能无人系统协同控制、信息物理系统安全控制, E-mail: [w.wang@buaa.edu.cn](mailto:w.wang@buaa.edu.cn).