

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2026.03.002

未知混凝土振捣环境下振捣机器人防碰撞控制

浦玉学^{1,2}, 卢炳辰¹, 王静峰^{1,2}, 苏颖³, 李满厚¹

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 土木工程结构与材料安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230009; 3. 交通工程混凝土结构智能建造安徽省联合共建学科重点实验室, 安徽 合肥 230031)

摘要: 振捣机器人的应用是混凝土结构浇筑方式转型升级的关键环节之一, 由于振捣过程发生在流动的湿混凝土下, 振捣机器人极易与钢筋、模板发生碰撞, 成为制约其应用的关键技术瓶颈之一。文章基于移动振捣机器人开展振捣机器人碰撞物识别及防碰撞技术研究。基于六维力传感器以及遗忘因子递归最小二乘(forgetting factor recursive least squares, FFRLS)算法实现对环境刚度和碰撞物类型识别, 开发变阻抗控制算法进行振捣机器人主动柔顺控制, 并设计机器人避障位姿调整策略。典型碰撞仿真实验的研究结果表明, 该文所设计的振捣碰撞物识别和防碰撞柔顺控制策略可以实现对不同碰撞物的精准识别, 有效避免振捣机器人与钢筋、模板的硬碰撞, 提高振捣施工的安全性。

关键词: 混凝土振捣; 振捣机器人; 碰撞控制; 参数辨识; 柔顺控制; 环境识别

中图分类号: TU645; TU601; TP242 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-5060(2026)03-0295-07

Anti-collision control of vibration robots in uncertain concrete vibration environments

PU Yuxue^{1,2}, LU Bingchen¹, WANG Jingfeng^{1,2}, SU Ying³, LI Manhou¹

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Anhui Key Laboratory of Civil Engineering Structures and Materials, Hefei 230009, China; 3. Traffic Concrete Structures Intelligent Construction Joint Laboratory of Anhui Province, Hefei 230031, China)

Abstract: The application of vibration robots is one of the key links in the transformation and upgrading of concrete structure pouring methods. Due to the vibration process occurring under flowing wet concrete, vibration robots are extremely prone to collisions with steel bars and formworks, becoming one of the critical technical bottlenecks restricting their application. This paper conducts research on collision object recognition and anti-collision technology for mobile vibration robots. Based on a six-axis force sensor and the forgetting factor recursive least squares (FFRLS) algorithm, environmental stiffness and collision object type recognition are achieved. A variable impedance control algorithm is developed for active compliance control of the vibration robot, and an obstacle avoidance posture adjustment strategy is designed. Through typical collision simulation experiments, it is found that the designed vibration collision object recognition and anti-collision compliance control strategy can achieve accurate identification of different collision objects, effectively avoid hard collisions between the vibration robot and steel bars/formworks, and improve the safety of vibration construction.

Key words: concrete vibration; vibration robot; collision control; parameter identification; compliance control; environment recognition

收稿日期: 2025-03-06; **修回日期:** 2025-10-07

基金项目: 安徽省自然科学基金资助项目(2508085ME099); 交通工程混凝土结构智能建造安徽省联合共建学科重点实验室(安徽建工路港建设集团有限公司)资助项目(2024-JLGLJ-001)和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(JJ2024HGTG0303)

作者简介: 浦玉学(1987—), 男, 安徽蚌埠人, 博士, 合肥工业大学副教授, 硕士生导师;

李满厚(1986—), 男, 安徽涡阳人, 博士, 合肥工业大学副教授, 博士生导师, 通信作者, E-mail: mhli@hfut.edu.cn.

0 引言

混凝土振捣是混凝土浇筑密实的关键环节,振捣效果对于混凝土结构质量具有重要的影响^[1-2]。目前,混凝土振捣主要以人工方式为主,存在效率低、成本高、施工安全风险大等诸多问题。振捣机器人作为一种新兴智能化施工技术,可显著提升振捣质量、提高施工效率、降低施工成本、减少安全风险,在推动建筑行业的技术进步方面极具潜力^[3-4]。然而在振捣机器人实际应用中,由于钢筋绑扎无法实现完全自动化和标准化,并且在流动湿混凝土的覆盖下,很难通过视觉等传感方式监测钢筋等预埋件位置,存在视觉感知受限的问题,振捣执行机构与钢筋等预埋件存在较大的碰撞概率。目前的振捣机器人一旦发生碰撞,仍然会以达到期望位置为运动目标,持续进行硬碰撞,导致建筑结构和振捣设备损坏,存在巨大的安全隐患。振捣机器人防碰撞控制一直是制约其应用的关键技术难题。在机器人领域常用的避障方法是通过视觉反馈实现对碰撞物的感知^[5-8]。然而振捣施工现场复杂,操作通常发生在湿混凝土内部,视觉传感器应用受限。因此研究机器人与环境交互力控技术来解决钢筋、模板等物体的碰撞问题,是值得深入研究的方向。

阻抗控制^[9]是一种通过将接触力误差转化为位移修正并动态调整末端执行器姿态来实现机械手柔顺性的方法,使机器人与环境接触时具有柔顺性^[10],尤其适合于振捣机器人系统的工作环境。阻抗控制通常分为 2 种类型:一种是直接对力进行控制;另一种则是通过控制位置来间接控制力。在实际工作环境中,由于多数机械臂并未开放电机力矩接口,直接控制机械臂末端力较为困难,且需要精确的动力学模型^[11],因此,在实践中多采用基于位置的阻抗控制方法。振捣施工环境复杂,振捣执行机构在工作过程中面临复杂接触环境,机器人碰撞时的环境刚度参数对阻抗控制性能有重要影响^[12-13]。此外,当采用传统的固定阻抗参数时,机械臂的末端力会产生稳态误差,严重制约控制效果^[14-16],因此设计合理的振捣环境刚度参数辨识和变阻抗算法对提高阻抗控制性能至关重要。

综上所述,将阻抗控制引入振捣机器人碰撞控制还存在以下问题亟需解决:① 阻抗控制在环境参数精确已知的情况下具有很好的控制效果,然而实际振捣环境是未知的;② 施工场景复杂,

振捣过程中被碰撞物识别以及防碰撞处理困难。

综合考虑混凝土振捣施工场景复杂,易发生钢筋、模板碰撞的施工痛点,本文基于移动振捣机器人开展未知振捣环境下振捣机器人碰撞识别及防碰撞技术,基于六维力传感器以及遗忘因子递归最小二乘(forgetting factor recursive least squares, FFRLS)算法实现对环境刚度和碰撞物类型识别;通过变阻抗控制算法设计振捣机械臂柔顺控制策略;基于 FFRLS 算法设计碰撞物刚度参数在线辨识算法,实现对被碰撞物类型的快速判别;针对不同碰撞物,设计运动位姿调整策略,有效避免振捣人与钢筋、模板的碰撞,提高振捣施工的安全性。

1 振捣机器人系统设计

1.1 系统架构

实际振捣施工环境由模板、钢筋网与湿混凝土共同构成,钢筋网由横向钢筋和纵向钢筋垂直交叉排列,部分结构还存在垂直钢筋。对工作环境进行建模,如图 1a 所示,设计的振捣机器人如图 1b 所示。

- 1) 移动平台:履带系统能保证在复杂施工环境中灵活移动;定位和导航模块确保机器人到达目标工作区域;中控台控制系统所有设备。
- 2) 六轴机械臂:具有 6 个自由度,实现对振捣执行器位置和姿态的精准控制。
- 3) 六维力传感器:获取机末端接触力信息。
- 4) 振捣执行器:减振夹手用于减小振捣棒与机械臂的震动耦合;振捣棒实现对混凝土的振捣。

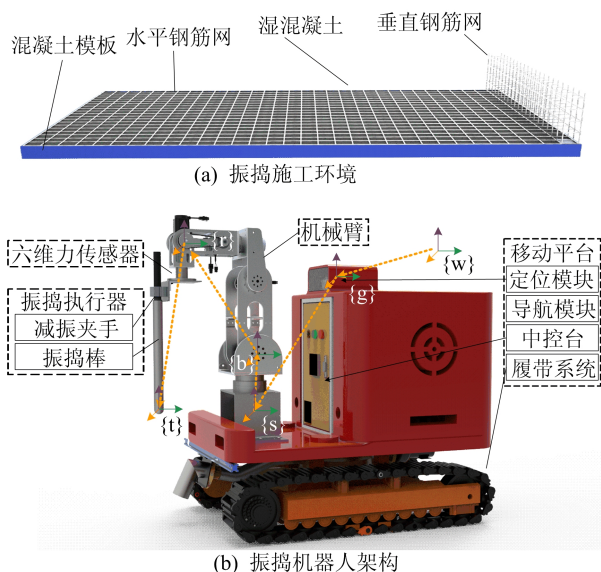


图 1 振捣机器人系统

1.2 振捣机器人运动学建模

机器人的运动学模型是描述机器人运动时各个关节、连杆之间几何关系的数学模型。通过运动学模型可以获得振捣棒相对于世界坐标系的位姿信息。

为了在实际空间中获取振捣机器人振捣棒的位置和姿态信息,需要建立移动平台的位姿映射关系,如图1b所示,分别将坐标系分为世界坐标系 $\{w\}$ 、移动平台的定位坐标系 $\{g\}$ 、机械臂固定坐标系 $\{s\}$ 、机械臂基坐标系 $\{b\}$ 、机械臂六轴关节坐标系 $\{r\}$ 和振捣棒末端点的工具坐标系 $\{t\}$, $\{g\}$ 、 $\{s\}$ 固定于车体, $\{s\}$ 与 $\{b\}$ 、 $\{r\}$ 与 $\{t\}$ 相对位置不变。

通过齐次变换矩阵,可得到 $\{w\}$ 下 $\{t\}$ 矩阵为:

$${}^w T = {}^w T_g {}^g T_s {}^s T_b {}^b T_r {}^r T_t \quad (1)$$

其中, ${}^w T_g$ 、 ${}^g T_s$ 、 ${}^s T_b$ 、 ${}^b T_r$ 、 ${}^r T_t$ 分别表示 $\{w\}$ 与 $\{t\}$ 、 $\{w\}$ 与 $\{g\}$ 、 $\{g\}$ 与 $\{s\}$ 、 $\{s\}$ 与 $\{b\}$ 、 $\{b\}$ 与 $\{r\}$ 、 $\{r\}$ 与 $\{t\}$ 的位姿变换关系。 ${}^w T$ 可以表示为:

$$({}^w x, {}^w y, {}^w z, \alpha, \beta, \gamma) \quad (2)$$

其中: ${}^w x$ 、 ${}^w y$ 、 ${}^w z$ 分别表示 $\{t\}$ 相对于 $\{w\}$ 的 x 、 y 、 z 位置分量; α 、 β 、 γ 分别为绕 Z 、 Y 、 X 轴旋转的角度。根据式(2)得到 $\{t\}$ 相对于 $\{w\}$ 的齐次变换矩阵 ${}^w T$ 为:

$$\begin{bmatrix} c\alpha c\beta & -s\alpha c\gamma + s\beta s\gamma c\alpha & s\alpha s\gamma + s\beta c\alpha c\gamma & {}^w x \\ s\alpha c\beta & s\alpha s\beta s\gamma + c\alpha c\gamma & s\alpha s\beta c\gamma - s\gamma c\alpha & {}^w y \\ -s\beta & s\gamma c\beta & c\beta c\gamma & {}^w z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, $c\alpha$ 、 $c\beta$ 、 $c\gamma$ 、 $s\alpha$ 、 $s\beta$ 、 $s\gamma$ 分别为 $\cos \alpha$ 、 $\cos \beta$ 、 $\cos \gamma$ 、 $\sin \alpha$ 、 $\sin \beta$ 、 $\sin \gamma$ 简写。

通过建立振捣机器人D-H运动学模型可以得到机械臂腕部坐标系的齐次变换矩阵 ${}^b T$,根据几何关系可以得到振捣棒相对于腕部的齐次变换矩阵 ${}^r T$,代入式(1)即可计算出振捣棒相对于 $\{w\}$ 的齐次变化矩阵 ${}^w T$,从而实现对振捣棒位姿的控制和检测。

1.3 振捣施工常见碰撞类型

振捣机器人的工作环境一般包含钢筋、模板等。由于钢筋绑扎和模板搭建很难做到完全精准化,导致在实际施工时机器人按照期望轨迹移动时容易与施工环境发生硬碰撞。结合施工工艺,本文将常见的碰撞类型分为振捣棒竖向插入碰撞钢筋、振捣棒竖向插入碰撞水平模板和振捣棒斜向插入碰到竖直模板3种情况,如图2所示。

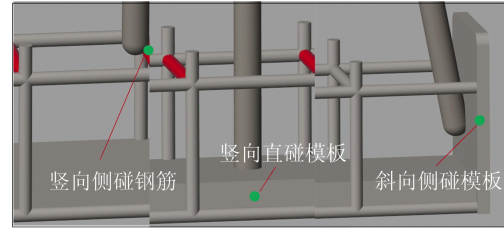


图2 振捣过程的典型碰撞示意图

设计的振捣机器人防碰撞方案如下:在振捣机器人工作时,通过安装在末端执行器的六维力传感器和环境刚度辨识算法来判断是否发生碰撞,若超过阈值则记录碰撞发生位置,立即启用阻抗控制算法,进行主动柔顺控制;同时基于采集接触力和碰撞物位置,通过所设计环境刚度识别算法估计被碰撞物等效刚度,并识别被碰撞物类型;依据碰撞物类型,进行避障路径规划。

2 振捣机器人阻抗控制

在振捣机器人工作时,一旦碰撞发生,为避免直接硬碰撞,破坏工程结构和振捣机器人,需要立即进行主动柔顺控制。本节在对传统阻抗控制性能分析的基础上,设计变阻尼参数策略,提高阻抗控制算法对复杂振捣环境的适应性。

2.1 阻抗控制

用二阶微分方程的形式来描述机械臂阻抗控制系统的等效数学模型:

$$\mathbf{M}_d(\ddot{\mathbf{X}} - \ddot{\mathbf{X}}_r) + \mathbf{B}_d(\dot{\mathbf{X}} - \dot{\mathbf{X}}_r) + \mathbf{K}_d(\mathbf{X} - \mathbf{X}_r) = \mathbf{F}_d - \mathbf{F}_c \quad (4)$$

其中: \mathbf{M}_d 、 \mathbf{B}_d 、 \mathbf{K}_d 分别为阻抗模型的惯性矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; \mathbf{X} 、 $\dot{\mathbf{X}}$ 、 $\ddot{\mathbf{X}}$ 分别为振捣机器人末端执行器的实际轨迹、实际速度、实际加速度; \mathbf{X}_r 、 $\dot{\mathbf{X}}_r$ 、 $\ddot{\mathbf{X}}_r$ 分别为振捣机器人末端执行器的参考轨迹、参考速度、参考加速度; \mathbf{F}_d 为振捣机器人期望接触力; \mathbf{F}_c 为实际环境接触力。

定义位置跟踪误差如下:

$$\mathbf{E} = \mathbf{X} - \mathbf{X}_c \quad (5)$$

对式(4)进行拉普拉斯变换得到:

$$\mathbf{E}(s) = \mathbf{H}(s)[\mathbf{F}_d(s) - \mathbf{F}_c(s)] \quad (6)$$

其中,阻抗控制的传递函数 $\mathbf{H}(s)$ 为:

$$\mathbf{H}(s) = \frac{1}{\mathbf{M}_d s^2 + \mathbf{B}_d s + \mathbf{K}_d} \quad (7)$$

当 $\mathbf{X} \rightarrow \mathbf{X}_r$,即实际位置趋于参考位置时,实际接触力 \mathbf{F}_c 将收敛到期望接触力 \mathbf{F}_d 。

阻抗控制图如图3所示,发生碰撞时进行阻抗控制,产生力误差,经过阻抗控制模型之后产生位置修正量 \mathbf{E} 、期望轨迹 $\mathbf{X}_d = \mathbf{X}_r + \mathbf{E}$,经逆运动学

计算出各关节期望角度 θ_d , 经过位置控制内环控制, 振捣机器人各关节运动到实际角度 θ 。

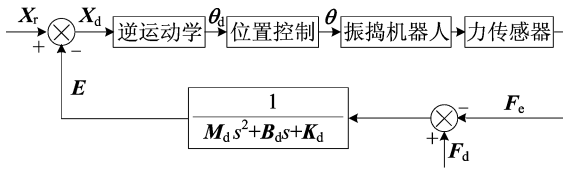


图 3 阻抗控制图

碰撞发生时, 用弹簧-阻尼模型来表示振捣机器人与环境之间的接触关系, 即

$$F_c = \begin{cases} K_c(X - X_c), & X - X_c < 0; \\ 0, & X - X_c \geq 0 \end{cases} \quad (8)$$

其中: X_c 为碰撞物位置; F_c 为机械臂与碰撞物之间的接触力; K_c 为碰撞物刚度。

2.2 阻抗控制误差分析

通常机器人与环境的阻抗模型在空间中每个自由度方向上都是解耦的。为简化对问题的分析, 用 $m_d, b_d, k_d, x, x_r, f_d, f_c, e$ 来代替 $M_d, B_d, K_d, X, X_r, F_d, F_c, E$, 得到机械臂末端在碰撞方向(以 x 方向为例)上的阻抗控制模型, 即

$$m_d(\ddot{x} - \ddot{x}_r) + b_d(\dot{x} - \dot{x}_r) + k_d(x - x_r) = e \quad (9)$$

$$e = f_d - f_c \quad (10)$$

$$h(s) = \frac{1}{m_d s^2 + b_d s + k_d} \quad (11)$$

进一步化简可得:

$$e = \frac{f_d + k_c(x_c - x_r)}{1 + k_c h(s)} = \frac{1}{1 + k_c h(s)} [f_d + k_c(x_c - x_r)] = \frac{m_d s^2 + b_d s + k_d}{m_d s^2 + b_d s + k_d + k_c} [f_d + k_c(x_c - x_r)] \quad (12)$$

当机械臂趋于稳定时, 速度和加速度趋近于 0, 可得到系统的稳态误差 e_{ss} 为:

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} e = \frac{k_d}{k_d + k_c} [f_d + k_c(x_c - x_r)] \quad (13)$$

若使稳态误差为 0, 则需要阻抗控制中的 $k_d=0$ 或 $f_d + k_c(x_c - x_r)=0$ 。而 k_d 过小会降低系统的稳定性^[16], 因此令 $f_d + k_c(x_c - x_r)=0$, 得到期望的参考轨迹为:

$$x_r = x_c + \frac{f_d}{k_c} \quad (14)$$

其中: x_c 为环境位置; x_r 为经过阻抗控制器得到的修正后的机械臂运动期望轨迹。

2.3 变阻抗控制

实验研究发现, 当外界环境不确定时, 若将阻

抗参数设定为固定值则难以达到理想的控制效果。将式 (11) 写成二阶传递函数的标准形式, 即

$$h(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (15)$$

$$\omega_n = \sqrt{k_d/m_d} \quad (16)$$

$$\zeta = \frac{b_d}{2\sqrt{m_d k_d}} \quad (17)$$

其中: ω_n 为系统的固有频率; ζ 为系统的阻尼比。

由上述公式可知, 目标阻尼参数 b_d 越大, 系统的阻尼比 ζ 越大, 系统就越稳定。发生碰撞时: 当目标阻尼参数 b_d 较大时, 系统响应超调减小, 但是过大的 b_d 会使系统响应到达稳定的时间变长; 当目标阻尼参数 b_d 较小时, 系统响应到达稳定的时间变短, 但系统震荡较大难以收敛。因此设置公式来调节系统阻尼比, 即

$$\zeta = \alpha + \beta\alpha |d_f| \quad (18)$$

其中: α 为偏置系数; β 为缩放系数; d_f 为期望接触力与实际接触力之差。

$$\alpha(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} - 0.5 \quad (19)$$

3 碰撞物刚度识别

振捣机器人与环境碰撞后, 需依据碰撞物类型快速调整, 避免持续接触。本文通过六维力传感器的接触力信息, 对环境刚度参数进行辨识, 精确的碰撞物刚度参数不仅可以提高阻抗控制性能, 还可以用来判断碰撞物体的类型。

环境刚度辨识的实时性与准确性直接影响机器人的响应速度和调整精度。在振捣作业场景中, 碰撞环境具有时变特性, 传统的刚度辨识算法如最小二乘(LS)法在动态场景中收敛速度慢, 且计算量随数据量增加呈线性增长, 难以满足实时控制需求; 递归最小二乘(RLS)算法虽然在实时性上有所提升, 但对时变系统的跟踪能力较弱, 易因环境参数突变导致辨识结果漂移。

考虑到计算量小、实时性高的需求, 本文采用 FFRLS 对环境刚度进行辨识。通过引入遗忘因子, 逐渐衰减历史数据的权重, 从而更快速地跟踪环境参数的动态变化, 尤其适用于湿混凝土这类时变特性显著的场景。

将环境接触模型改写为:

$$F_c(k) = \hat{k}_c(x - x_c) = [x - x_c \ 1] \begin{bmatrix} \hat{k}_c \\ 0 \end{bmatrix} = \theta_k^T \varphi_k \quad (20)$$

其中: $F_c(k)$ 为 k 时刻的环境接触力; θ_k 为辨识的

环境刚度向量; $\boldsymbol{\varphi}_k$ 为接触位置向量。

由于历史数据限制,经典 RLS 算法会出现数据饱和现象,使得辨识效率下降。引入遗忘因子 λ ,使原始数据对下次预测值的影响逐渐减小,从而保证预测值的稳定,计算公式如下:

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}_k = \hat{\boldsymbol{\theta}}_{k-1} + \mathbf{K}_k [F_e(k) - \hat{\boldsymbol{\theta}}_{k-1}^T \boldsymbol{\varphi}_k] \quad (21)$$

$$\mathbf{K}_k = \frac{\mathbf{P}_{k-1} \boldsymbol{\varphi}_k}{\lambda + \boldsymbol{\varphi}_k^T \mathbf{P}_{k-1} \boldsymbol{\varphi}_k} \quad (22)$$

$$\mathbf{P}_k = \frac{(\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \boldsymbol{\varphi}_k^T) \mathbf{P}_{k-1}}{\lambda} \quad (23)$$

其中: $\hat{\boldsymbol{\theta}}_k$ 为第 k 次碰撞物刚度参数估计值向量; \mathbf{P}_k 为协方差矩阵; \mathbf{K}_k 为增益矩阵; λ 为遗忘因子。

4 避障策略

对于确定的钢筋材料、直径以及钢筋布局、支撑条件并考虑到绑扎精度以及现场环境等不确定因素影响,其钢筋局部刚度分布在一定的范围内, $k_{red} \leq k_c \leq k_{reu}$, k_{red} 和 k_{reu} 分别为钢筋局部刚度的下、上边界。对于确定的模板材料、结构及支撑系统,其局部刚度分布在一定的范围内, $k_{blid} \leq k_c \leq k_{blu}$, k_{blid} 和 k_{blu} 分别为钢筋局部刚度的下、上边界。

若振捣过程中发生碰撞,通过阻抗控制避免硬碰撞并进行环境刚度识别后,则可根据不同类别的被碰撞刚度特性,判定被碰撞物类型,进而进行避障策略设计。

根据碰撞方向和碰撞物类型,分为以下 3 种典型的避障策略。

1) 避障策略 1 如图 4a 所示。当振捣棒竖向侧碰钢筋时,振捣棒 z 方向和 x 方向会产生接触力,此时调整振捣棒方向沿 k_{blu} 的方向不断移动,移动距离大于 Δx ,之后保持 x 方向不变,调整 y 、 z 方向直至达到预设点。

$$\Delta x = nD_{re} \quad (24)$$

其中: n 取值范围为 0.5~2; D_{re} 为钢筋直径。

2) 避障策略 2 如图 4b 所示。当振捣棒竖向插入碰到水平模板时,振捣棒 z 方向会产生碰撞力,此时调整振捣棒沿 z 反方向不断移动,移动距离满足:

$$R_0 \leq \Delta z \leq R_{zd} \quad (25)$$

其中, R_0 、 R_{zd} 为移动上、下限, R_{zd} 也为振捣棒振捣半径。

3) 避障策略 3 如图 4c 所示。当振捣棒倾斜插入碰到立模板时,振捣棒 x 方向会产生接触力,此时调整振捣棒方向沿 x 反方向移动,移动距离满足:

$$R_0 \leq \Delta x \leq R_{zd} \quad (26)$$



图 4 避障策略图

在振捣过程中的防碰撞控制核心是通过阻抗控制避免硬碰撞,采用环境刚度识别算法进行环境刚度辨识,并对被碰撞物进行识别,进而执行不同的防碰撞策略。振捣机器人防碰撞控制框架图如图 5 所示。

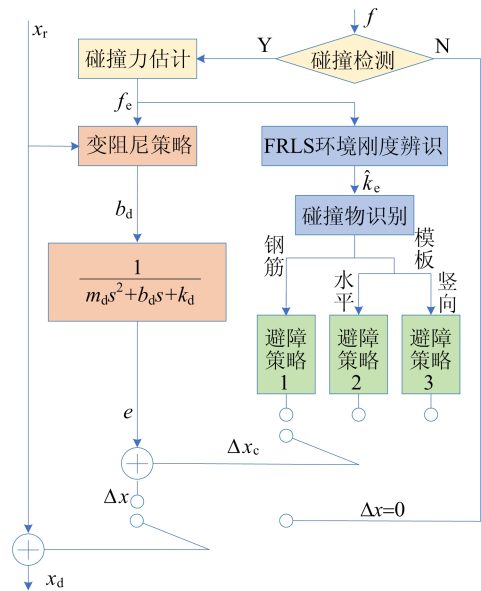


图 5 振捣机器人防碰撞控制框架图

5 仿真分析

为验证所提出的振捣机器人防碰撞识别、阻抗柔顺控制、碰撞物刚性辨识及类型判别、防碰撞策略的有效性,采用振捣机器人进行防碰撞仿真。钢筋、模板等施工环境参数见表 1 所列。

表 1 钢筋、模板等施工环境参数

参数	参数描述	数值
$k_{red}/(\text{N/m})$	模板刚度下界	8 420
$k_{reu}/(\text{N/m})$	模板刚度上界	10 420
$k_{blid}/(\text{N/m})$	钢筋刚度下界	14 000
$k_{blu}/(\text{N/m})$	钢筋刚度上界	16 000
f_d/N	期望接触力	5
D_{re}/m	钢筋直径	0.020
R_{zd}/m	振捣半径	0.50

振捣棒主要有垂直插入和倾斜插入 2 种。垂直插入上下提插,可确保混凝土均匀密实;倾斜插入通常指振捣棒在不满足垂直插入的前提下,以一定的角度插入混凝土,增大振动范围。为讨论设计的防碰撞控制器控制效果,分为垂直插入和倾斜插入 2 种情况进行仿真。

5.1 垂直插入防碰撞振捣

本节工况为振捣棒在垂直插入混凝土过程中依次与钢筋和模板发生碰撞,可分为以下 5 个阶段:

阶段 1 在试验开始前机器人移动到目标位置后定位,振捣机械臂从初始点移动到 $P_1(0, -0.5, 0, 0.137, 0, 0, 0)$;

阶段 2 $0 \sim 4$ s,从 P_1 点垂直插入湿混凝土目标位置 $P_2(0.08, -0.5, -0.45, 0, 0, 0)$,进行振捣;

阶段 3 设置钢筋位置为 $P_r = (0.07, y, -0.2)$,在 P_1 到 P_2 移动过程中与钢筋发生碰撞,识别碰撞物类型执行相应避障策略,修正插入目标位置为 $P_3(0.08 + \Delta x, -0.5, -0.45, 0, 0, 0)$;

阶段 4 设置模板位置 $P_m(x, y, -0.4)$,振捣机器人运动到新目标点 P_3 过程中, z 方向将发生模板碰撞,识别碰撞物类型执行相应避障策略,修正插入目标位置为 $P_4(0.08 + \Delta x, -0.5, -0.45 + \Delta z, 0, 0, 0)$;

阶段 5 振捣机器人运动到新目标点 P_4 ,完成振捣竖向插入振捣。

该工况仿真实验结果如图 6 所示。在阶段 3, 1.9 s 左右振捣棒与钢筋发生碰撞,控制系统采用式(4)立即进行阻抗柔顺控制,同时依据式(21)对环境刚度进行识别。由图 6a 可知:在无防碰撞控制策略情况下,接触力无法得到控制,会引起结构破坏;由于本文采用主动柔顺控制策略,避免振捣棒与钢筋直接硬碰撞,碰撞力控制在 5 N 以内,并且迅速降低为 0。由图 6b 可知,在 2 s 左右碰撞物刚度识别达到稳定状态,此时识别被碰撞物刚度 $\hat{k}_c = 9\ 420$ N/m。通过碰撞物识别环节并根据表 1 中被碰撞物刚度识别区间,可判别被碰撞物为钢筋,执行避障策略 1。依据式(24)计算得到 $\Delta x = -0.015$ m,实现钢筋避障。

在阶段 4, 2.9 s 左右振捣棒与底模板发生碰撞,采用主动柔顺控制策略,将碰撞力控制在 5 N 以内,并且迅速降低为 0 N;在 3.2 s 左右,完成碰撞物刚度识别并达到稳定状态,此时识别被碰撞物刚度 $\hat{k}_c = 15\ 000$ N/m。通过碰撞物识别环节并根据表 1 中的被碰撞物刚度识别区间,可判别被碰撞物为水平底模板,执行避障策略 2,调整振捣棒向受力方向 z 方向移动,在 3.25 s 左右接触力为 0 N,完成避障策略 2, $\Delta z = 0.1$ m,修正插入目标位置为 $P_4(0.065, -0.5, -0.35, 0, 0, 0)$ 。

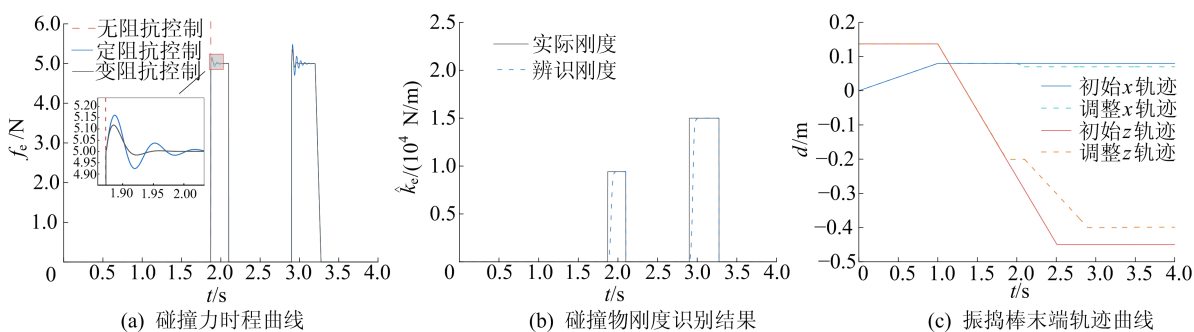


图 6 垂直插入防碰撞振捣曲线

5.2 倾斜插入防碰撞振捣

本节工况为振捣棒以斜向插入混凝土过程中与竖向模板发生碰撞。分为以下 3 个阶段:

阶段 1 机器人移动到目标位置,振捣机械臂从初始点位姿 $P_h(0, -0.5, 0, 0, 0, 0)$ 调整姿态到 $P_1(0, -0.5, 0, 0, -10, 0)$,振捣棒绕 y 轴倾斜 -10° ;

阶段 2 $0 \sim 2.1$ s,从 P_1 点斜向插入湿混凝土目标位置 $P_2(0.08, -0.5, -0.3, 0, -10, 0)$,

进行振捣;

阶段 3 设置模板位置为 $P_{mx} = 0.07$ m,在 P_1 到 P_2 移动过程中与竖向模板发生碰撞,识别碰撞物类型执行相应避障策略。修正插入目标位置为 $P_3(0.08 + \Delta x, -0.5, -0.3, 0, -10, 0)$ 。

该工况仿真实验结果如图 7 所示。由图 7 可知,在 0.87 s 左右与模板发生碰撞并进行阻抗控制,在 1.1 s 左右达到稳定状态,此时识别被碰撞物刚度 \hat{k}_c 为 15 000 N/m。通过碰撞力方向并根

据表1中的被碰撞物刚度识别区间,可判别被碰撞物为竖向模板,执行避障策略3,调整 $\Delta x =$

-0.015 m,实现模板避障。修正并执行插入目标位置为 $P_4(0.065, -0.5, -0.3, 0, -10, 0)$ 。

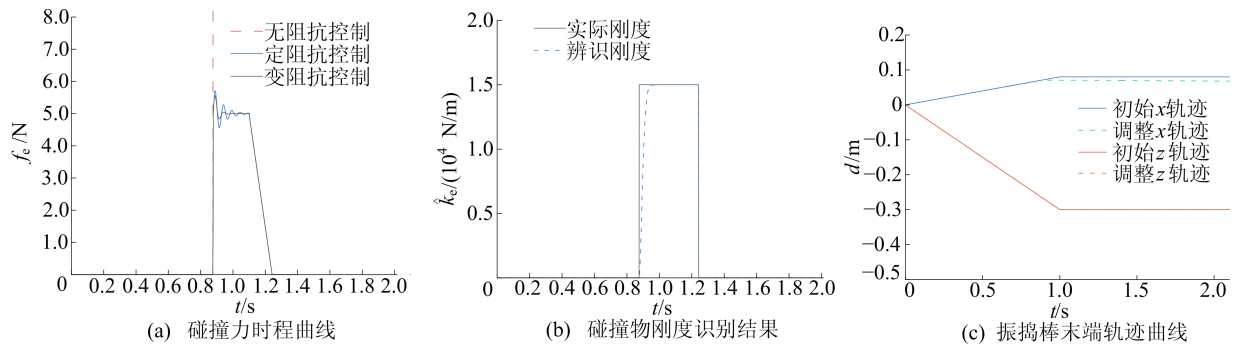


图7 倾斜插入防碰撞振捣曲线

6 结 论

本文围绕振捣机器人在实际应用中由于视觉感知受限引起的振捣执行机构与钢筋等预埋件存在的碰撞问题,通过变阻抗控制实现了振捣机器人主动柔顺控制,有效避免硬碰撞的发生;基于FFRLS算法对碰撞物刚度在线辨识,实现对被碰撞物的快速判别,并针对不同碰撞物类型制定了防碰撞轨迹规划策略。

仿真结果表明,本文所提出的防碰撞柔顺控制策略在不同的工况场景下均表现出优异的防碰撞控制效果。

[参 考 文 献]

[1] 温家馨,黄法礼,王振,等. 混凝土振捣技术研究现状与发展趋势[J]. 硅酸盐通报,2021,40(10):3326-3336.
 [2] 田正宏,马元山,李俊杰. 混凝土振捣密实性研究进展[J]. 建筑材料学报,2024,27(1):46-57.
 [3] 储亚东,李成刚,陈飞翔,等. 混凝土平仓振捣机发展综述[J]. 水利水电技术,2020,51(12):99-110.
 [4] 王晓玲,王栋,任炳昱,等. 高拱坝混凝土振捣机器人系统研发及应用[J]. 水利学报,2022,53(6):631-643,654.
 [5] 李树春,张静,张华,等. 面向机器人抓取过程中目标位姿估计方法[J]. 传感器与微系统,2019,38(7):32-34.
 [6] LI H, WANG X F, HUANG X, et al. Multi-Joint active collision avoidance for robot based on depth visual perception [J]. IEEE-CAA Journal of Automatica Sinica, 2022, 9(12): 2186-2189.
 [7] 张建华,任宝珍,赵岩,等. 基于二分试探的平面冗余机械臂碰撞检测与避障[J]. 机械工程学报,2023,59(1):113-122.

[8] KE F, LI Z J, XIAO H Z, et al. Visual servoing of constrained mobile robots based on model predictive control [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2017, 47(7): 1428-1438.
 [9] ZHAO X W, HAN S B, TAO B, et al. Model-Based actor-critic learning of robotic impedance control in complex interactive environment [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(12): 13225-13235.
 [10] 李连鹏,解仑,刘振宗,等. 基于人机交互的重载机械臂控制方法[J]. 机器人,2018,40(4):525-533.
 [11] 苏鹏,谢实辉,刘霖,等. 基于阻抗控制的骨外固定机器人矫形力自适应跟踪[J]. 仪器仪表学报,2023,44(11):99-108.
 [12] ZHOU B, LIU Y, LIU H, et al. Constant force control of manipulator based on variable stiffness adaptive admittance mechanism [J]. Control Theory and Technology, 2023, 40(10): 1880-1888.
 [13] 周波,刘奕荣,刘会昌,等. 基于变刚度自适应导纳机制的机械臂恒力控制[J]. 控制理论与应用,2023,40(10):1880-1888.
 [14] DONG J, XU J, ZHOU Q, et al. Physical human-robot interaction force control method based on adaptive variable impedance [J]. Journal of the Franklin Institute, 2020, 357(12): 7864-7878.
 [15] HUANG Y C, LI S Q, HUANG Q. Robust impedance control for seas [J]. Journal of the Franklin Institute, 2020, 357(12): 7921-7943.
 [16] JI W, TANG C C, XU B, et al. Contact force modeling and variable damping impedance control of apple harvesting robot [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 198: 107026.

(责任编辑 胡亚敏)