

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2413548

基于阵列压力传感器的嵌套式递推分布力辨识*

齐超群¹, 彭思淇², 张慧博³, 戴士杰¹

(1. 河北工业大学机械工程学院 天津 300401; 2. 哈尔滨工业大学航天学院 哈尔滨 150001;
3. 哈尔滨工程大学机电工程学院 哈尔滨 150001)

摘要:针对合作目标消旋/捕获过程中柔性接触分布力实时精确辨识的挑战,提出了一种基于阵列压力传感器的嵌套式递推分布力辨识方法,实现了分布力接触域及其分布特性在时空耦合条件下的实时描述。首先,建立了分布接触力模型,利用其幂指数函数特性进行对数空间变换,随后引入形函数对分布力的时空特征进行解耦。在嵌套内层的空间域上,提出了一种改进 Sigmoid 函数的权重方程,并构建了基于 S 形权重函数的加权最小二乘法(S-WLS),以修正通过相邻响应量区域搜寻算法获得的接触域几何参数。在嵌套外层的时间域中,同时引入遗忘因子和权重因子,构建了用于动态求解分布力标准方程的递推式,并通过指数变换实现了分布力特征参数的精确辨识。最后,设计了基于阵列压力传感器的分布力采集系统,研制了等效微重力碰撞平台,并开展了斜碰实验。实验结果表明,所提方法相较于传统加权最小二乘法(WLS)在分布力特征参数辨识上具有显著优势,分布力辨识的相对误差范围仅为 $\pm 8.8\%$ 。进一步采用 Hazen 计分方法对相对误差进行了 95% 置信水平的正态检验,验证了本方法的准确性和有效性。为后续空间碎片消旋/捕获中动态分布力精确预示提供了理论基础和技术方案。

关键词:空间碎片;阵列压力传感器;分布力;参数辨识;微重力碰撞实验

中图分类号: TH113 TH823 TH89 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Nested recursive identification for distributed force based on array pressure sensor

Qi Chaoqun¹, Peng Siqi², Zhang Huibo³, Dai Shijie¹

(1. School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China; 2. School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 3. School of Mechanical and Electrical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: To address the challenge of real-time and precise identification of distributed forces during flexible contact in cooperative target de-tumbling and capture processes, this paper proposes a nested recursive distributed force identification method based on an array pressure sensor. This method achieves real-time characterization of the contact area and distribution characteristics of distributed forces under spatiotemporal coupling conditions. First, a distributed contact force model is established, and its power-exponential function properties are utilized to perform a logarithmic space transformation. A shape function is then introduced to decouple the spatiotemporal characteristics of the distributed force. In the spatial domain of the nested inner layer, an improved weight equation based on the Sigmoid function is proposed, and a weighted least squares method using the S-shaped weight function (S-WLS) is developed to refine the geometric parameters of the contact area obtained through a neighboring response region search algorithm. In the time domain of the nested outer layer, both a forgetting factor and a weight factor are introduced to construct a recursive formula for dynamically solving the standard equation of distributed force. Accurate identification of the distributed force characteristic parameters is achieved through exponential transformation. Finally, a distributed force acquisition system based on an array pressure sensor is designed, and an equivalent microgravity collision platform is developed to conduct oblique collision experiments. Experimental results demonstrate that the proposed method significantly outperforms the traditional weighted least squares (WLS) method in identifying distributed force

收稿日期: 2024-11-28 2024-11-28

* 基金项目: 国家自然科学基金航天联合基金重点支持项目(U21B2075)、国家自然科学基金面上项目(52475249)资助

characteristic parameters, with a relative error range of only $\pm 8.8\%$. Furthermore, the Hazen scoring method is applied to perform a normality test on the relative error at a 95% confidence level, confirming the accuracy and effectiveness of the proposed method. This work provides a theoretical foundation and technical solution for the accurate prediction of dynamic distributed forces in space debris de tumbling and capture applications.

Keywords: space debris; array pressure sensor; distributed force; parameter identification; microgravity collision experiment

0 引 言

空间碎片对在轨航天器和航天任务造成巨大威胁,通过提高航天器自身防护与变轨规避能力已经不足以满足在轨操控任务的环境安全需求^[1-3],主动清除(active debris removal, ADR)任务迫在眉睫。面向空间碎片的操作需要有效衰减其角动量,并且尽可能减少二次衍生碎片的风险,空间碎片柔性消旋捕获技术已然成为航天领域的研究热点之一^[4-7]。柔性消旋属于接触式消旋技术,兼具了消旋效率高和冲击作用平缓的优点。通常以柔性材料作为执行机构末端,利用柔性末端与空间碎片的直接冲击接触产生的反作用力/力矩实现目标角动量衰减。柔性消旋任务中关键力学环节是执行机构柔性末端与空间碎片的接触碰撞行为,其中接触行为表现为短暂持续性、接触分布力呈现非线性的特点。面向分布接触力的辨识对精准揭示消旋作用下的空间碎片动力学响应具有重要意义。

由于空间消旋技术仍处于理论验证阶段,且在轨实验面临高成本和高风险等挑战,地面微重力碰撞试验为消旋捕获方法的验证和优化提供了经济、可靠且周期更短的替代方案。常用的碰撞实验方法包括重锤法^[8]、气弹法^[9]和轨道法^[10]。重锤法通过重锤的自由下落或者摆动撞击目标,进而获得碰撞力学响应。Alves等^[8]利用重锤法测定了钢球在不同初始高度和冲击速度下的接触力,用以评估典型粘弹性接触力模型的性能。该方法易于操作、成本低廉,但由于重锤始终受重力影响,在模拟复杂微重力环境下的空间碰撞时面临较大挑战。气弹法是通过压缩气体推动目标发生碰撞接触,适用于高速、轻质、弹性物体的碰撞实验。然而,其脉冲激发形式无法模拟持续性和非线性的碰撞接触行为,难以提供连续且有效的数据支撑。轨道法依靠轨道系统和辅助设备,通过预设路径引导目标在特定位置和速度下发生碰撞。该方法控制精度高,可重复性好。但轨道和滑块之间的摩擦力会影响碰撞速度的精度。综上,相较于重锤法和气弹法,轨道法更适用于模拟复杂的空间目标碰撞行为。但摩擦力对漂浮目标碰撞特性的影响不可忽视,仍需进一步结合微重力技术,优化实验设计,从而提供更全面、更精确的验证手段。

在碰撞接触分布力的采集方面,当前主流方法是利用阵列式压力传感器^[11-12]。这类传感器能够捕捉离散的接触力数据,并初步确定接触区域及区域内各点的压力分布。传感器将响应区域划分为多个离散单元,通过分析每个单元的响应数量和坐标位置,进而计算出接触区域面积和压力值^[13-17]。然而,传感器的电阻电容效应、复合导电材料和单元布置方式等因素,会导致采集数据出现延迟滞后、非线性变化和对传感器特性依赖等问题^[18-21]。此外,环境噪声、传感器信号干扰及电子设备的工作噪声等因素^[22],往往在实验过程中对数据质量造成显著影响。这些噪声具有不可预测的高频特性,可能与实际的碰撞信号混杂,使得数据中的高频成分难以与真实的动态响应区分开,从而增加了测量的误差和不确定性。这些问题使得接触力的精准采集和数据处理变得更加复杂。为了应对数据噪声带来的负面影响,当前研究普遍使用高斯分布等数学模型进行数据去噪^[23-25],并通过基于深度学习模型的数据校准方法减少延迟性影响^[26-27]。这些降噪方法在一定程度上改善了数据质量,但由于碰撞是一个高频、瞬时的动态过程,其力学响应应具有显著的非线性和时变性,这使得接触域和碰撞力的分布形式难以准确描述。因此,在求解这类基于数据特征反演接触参数的接触力辨识问题时,不仅面临着接触分布力在空间和时间维度上的解耦问题,还很难保证解的稳定性和实时性。在复杂环境的ADR任务中,现有的接触分布力辨识方法面临着巨大的挑战,难以有效捕捉碰撞过程中瞬时变化的动态特性,导致无法高效实时地获取准确的接触力分布,从而影响后续消旋/捕获调控。

为此,提出了一种基于阵列压力传感器的嵌套式递推分布力辨识方法,旨在解决接触碰撞力辨识过程中采集噪声大、动态特性难以实时辨识的问题。其核心在于选择合理的分布力模型,确定接触域几何参数和分布力特征参数变量。搭建可靠的分布力采集系统,利用阵列传感器实时测得的离散阵列压力进行数据的深度挖掘,获得相应模型特征参数。同时兼顾降低传感器分辨率和噪声对特征参数辨识的影响。最后通过实验对比分析论证所提方法在柔性接触行为中对接触域几何参数和分布力特征参数辨识上的优越性。并对辨识结果进行统计学正态假设检验,论证该方法的有效性和准确性。

1 理论分析

1.1 方法概述

针对柔性末端在冲击过程中分布力动态精确描述问题,关键是利用有限的测量信息对分布力模型主要力学特征参数进行辨识。本研究提出一种基于阵列压力传感器的嵌套递推式分布力辨识方法,辨识流程框架如图 1 所示。其核心思想:从接触力学基础理论出发,构建分布力接触模型,并确立关键力学特征参数。依赖于阵列压力传感器获得的阵列压力数据,挖掘数据特征形成辨识模型的输入和输出。通过对模型标准化时空分解,在嵌套内层上对单一时刻下空间域内的接触几何参数进行修正,解决阵列压力传感器噪声和分辨率对相邻响应量的区域搜寻算法 (neighboring response region search algorithm, NRRSA)^[10] 的影响。在嵌套外层上对具有时序特性的分布参数进行递推更新求解,最终实现动态时变分布力参数的辨识。

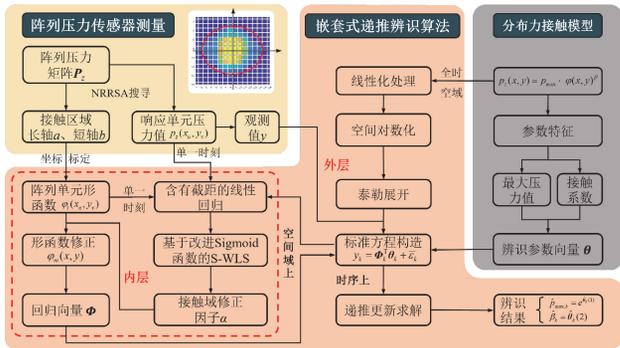


Fig. 1 Framework of nested recursive distributed force identification

1.2 分布接触力模型构建

典型的曲面柔性末端与平板的碰撞接触过程主要包括压缩和恢复两个阶段,如图 2 所示。状态 I 时刻描述的是曲面柔性末端与平板处于接触临界状态,此时两者尚未发生变形。状态 II 时刻,曲面柔性末端与平板的相对速度为零,此时压缩变形和接触力达到最大。在状态 III 时刻,曲面柔性末端与平板处于分离接触临界状态,两者之间的变形完全恢复,即将发生分离。为了描述这一接触过程具有一般性,曲面柔性末端和平板的外轮廓采用曲面原点处的最大曲率半径 r 和最小曲率半径 r' 进行近似描述,外轮廓通常可表达为:

$$z(x, y) = \frac{1}{2r}x^2 + \frac{1}{2r'}y^2 \quad (1)$$

式中: x 和 y 表示接触点的坐标值。

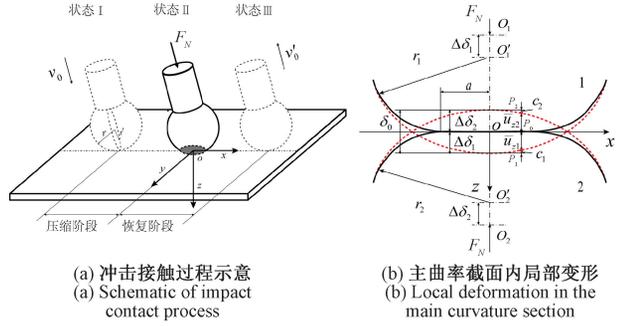


图 2 柔性末端接触碰撞过程

Fig. 2 Schematic of the flexible end contact collision process

图 2(b) 描述了两个物体在接触过程中 (压缩阶段和恢复阶段) 在主曲率截面内的局部变形。这里将两个物体采用同一个坐标描述,其临界接触未变形前的间隙函数描述为:

$$c_0(x, y) = \frac{1}{2R}x^2 + \frac{1}{2R'}y^2 \quad (2)$$

式中: R 和 R' 是接触表面的相对主曲率半径。值得注意的是当间隙函数 c_0 取常数值时,式 (2) 为椭圆方程,这正是 Hertz 假设接触域为椭圆的基础,也为本文分布力接触域的辨识提供了理论基础。

在接触表面的任一 P_0 点,在变形前分别对应于物体 1 和物体 2 的 P_1 和 P_2 两点。两个物体的原始轮廓 (虚线所示) 沿 z 方向变形后变成了接触表面 (实线所示),则沿 z 方向变形后的间隙函数为:

$$c(x, y) = c_0(x, y) + \bar{u}_{z1} + \bar{u}_{z2} - \delta_0 \quad (3)$$

式中: \bar{u}_{z1} 和 \bar{u}_{z2} 分别是表面 P_1 和 P_2 两点沿 z 方向移动到 P_0 点的变形位移; δ_0 是位于坐标原点的最大接触变形,且 $\delta_0 = \bar{u}_{z1}(0, 0) + \bar{u}_{z2}(0, 0)$ 。

据此可判断任意一点的所在位置,即:

$$\begin{cases} c(x, y) > 0, & \text{接触域外} \\ c(x, y) = 0, & \text{接触域内} \end{cases} \quad (4)$$

在 xOy 平面内,沿 x 轴方向在 $x = x_a$ 处的变形记为 $\Delta\delta$,且 $\Delta\delta = \bar{u}_{z2}(0, 0) - \bar{u}_{z2}(x_a, 0)$ 。则在接触域内,存在:

$$\Delta\delta_1 + \Delta\delta_2 = \frac{1}{2R}x^2 + \frac{1}{2R'}y^2 \quad (5)$$

对式 (5) 进行标准化,则有:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (6)$$

式中: $a = \sqrt{2R \cdot (\Delta\delta_1 + \Delta\delta_2)}$; $b = \sqrt{2R' \cdot (\Delta\delta_1 + \Delta\delta_2)}$ 。

据此可定义在两个物体接触的切向平面 (即 xOy 平面) 内的形函数为 $\varphi(x, y)$, 且有:

$$\varphi(x, y) = 1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} \quad (7)$$

当 $0 < \varphi(x, y) < 1$ 时,点在接触域内;当 $\varphi(x, y) = 0$

时,点在接触域的边界上。

基于接触力学基本理论^[28],分布力的通用式可表示为接触域上最大压力和接触系数的函数关系,且有:

$$p_z(x, y) = p_{\max} \cdot \left(1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}\right)^\beta \quad (8)$$

式中: p_{\max} 为接触域上最大压力值; β 是接触系数。

在任意碰撞时刻,依赖于阵列压力传感器可获得接触域内测量单元的压力阵列。这意味着在式(7)和(8)中,形函数值 $\varphi(x, y)$ 和压力值 $p_z(x, y)$ 是已知的输入量,而最大压力值 p_{\max} 和接触系数 β 为未知参数。

1.3 线性化处理

由于实验过程中存在不确定的非线性因素,阵列压力传感器测量时会受到系统噪声和随机噪声的干扰,在实验的任意时刻 t 的测量噪声记作 ε_t 。则考虑含有噪声的分布力方程为:

$$p_{z,t}(x_u, y_v) = p_{\max,t} \cdot \varphi_t(x_u, y_v)^{\beta_t} + \varepsilon_t \quad (9)$$

式中: (x_u, y_v) 代表阵列压力传感器测量单元在标定坐标系中的坐标值。

根据式(7),在接触域内形函数值始终满足 $\varphi_t(x_u, y_v) > 0$ 。由于阵列测量单元的形函数值与相应的压力值呈非线性关系,为简化参数辨识的过程,对式(9)两边同时取自然对数,将其转换为线性关系,可表示为:

$$\ln[p_{z,t}(x_u, y_v)] = \ln(p_{\max,t}) + \beta_t \cdot \ln[\varphi_t(x_u, y_v)] + \ln\left[1 + \frac{\varepsilon_t}{p_{\max,t} \cdot \varphi_t(x_u, y_v)^{\beta_t}}\right] \quad (10)$$

在接触域几何中心(即形函数为最大值 $\varphi_t(x_0, y_0)$)处进行泰勒展开,得到:

$$\ln[p_{z,t}(x_u, y_v)] \cong \ln(p_{\max,t}) + \beta_t \cdot \ln[\varphi_t(x_u, y_v)] + \ln\left[1 + \frac{\varepsilon_t}{p_{\max,t} \cdot \varphi_t(x_u, y_v)^{\beta_t}}\right] + \frac{\varepsilon_t \cdot \varphi_t(x_0, y_0)^{\beta_t}}{p_{\max,t} \cdot \varphi_t(x_0, y_0)^{\beta_t} + \varepsilon} \cdot \left[\frac{1}{\varphi_t(x_u, y_v)^{\beta_t}} - \frac{1}{\varphi_t(x_0, y_0)^{\beta_t}}\right] \quad (11)$$

当响应测量单元的位置位于接触域几何中心附近时,根据式(7),对于任意的 β_t ,形函数 $\varphi_t(x_0, y_0)$ 将收敛到1。又因为 $\varepsilon_t \ll p_{\max,t}$, 所以有:

$$\ln\left[1 + \frac{\varepsilon_t}{p_{\max,t} \cdot \varphi_t(x_0, y_0)^{\beta_t}}\right] \cong \frac{\varepsilon_t}{p_{\max,t} \cdot \varphi_t(x_0, y_0)^{\beta_t}} \quad (12)$$

由此式(11)可以简化为:

$$\ln[p_{z,t}(x_u, y_v)] \cong \ln(p_{\max,t}) + \beta_t \cdot \ln[\varphi_t(x_u, y_v)] + \bar{\varepsilon}_t \quad (13)$$

式中: $\bar{\varepsilon}_t$ 代表模型近似误差; $\bar{\varepsilon}_t$ 如式(14)所示。

$$\bar{\varepsilon}_t = \frac{\varepsilon_t}{p_{\max,t}} + \frac{\varepsilon_t}{p_{\max,t} + \varepsilon_t} \cdot \left[\frac{1}{\varphi_t(x_u, y_v)^{\beta_t}} - 1\right] \quad (14)$$

1.4 接触域描述与修正

1) 接触域描述

在任意时刻,定义分布压力矩阵 \mathbf{P}_z 由阵列压力传感器中响应单元的压力值构成,其中矩阵的行列数与阵列压力传感器的响应单元数量一致,且矩阵元素之间的排列关系与对应的响应单元相对位置保持一致。为获取接触域长、短轴,采用 NRRSA 算法对分布压力矩阵 \mathbf{P}_z 进行数据初步处理。其基本原理是对响应单元周围单元响应数量进行统计,获得行、列方向最大响应单元数量。并通过搜寻最大压力所在行列为坐标轴,实现各响应单元的坐标转换。具体有:

$$l_i = \left(N_i + \frac{\text{sgn}(\eta) - 1}{2}\right) \cdot (d_r + d_c), \quad i = 1, 2 \quad (15)$$

式中: N_1 和 N_2 分别为矩阵 \mathbf{P}_z 行、列方向上最大响应单元总和; d_r 和 d_c 分别是阵列压力传感器测量单元与其间隔区域的尺寸大小。其中, η 定义为边界因子,且:

$$\text{sgn}(\eta) = \begin{cases} 1, & \eta > 0 \\ 0, & \eta = 0 \\ -1, & \eta < 0 \end{cases} \quad (16)$$

当接触域边界线均位于响应单元间隔区域时, $\eta > 0$; 当边界线均位于响应单元内时, $\eta < 0$; 其他情况, $\eta = 0$ 。

由此可获得任意 t 时刻接触域内的长、短轴为:

$$\begin{cases} a_t = \frac{\max(l_1, l_2)}{2} \\ b_t = \frac{\min(l_1, l_2)}{2} \end{cases} \quad (17)$$

此时阵列压力传感器测量单元的形函数 $\varphi(x, y)$ 为:

$$\varphi_t(x_u, y_v) = 1 - \frac{x_u^2}{a_t^2} - \frac{y_v^2}{b_t^2} \quad (18)$$

2) 接触域参数修正

(1) 权重确定

从式(7)可以观察到,在 xOy 平面内(即接触平面)接触域为一椭圆,根据 Hertz 接触理论^[28],点载荷应力的衰减与距离半径成反比,这就意味着在接触区域的边界附近的压力梯度较大。考虑到该边界效应的影响和传感器的特性,数据的质量也关乎最终参数的辨识。另外,观察式(13),在经过对数化和泰勒展开后,分布力函数在对数坐标下是一个线性函数,为保证展开的精度,越靠近中心点的 (x_0, y_0) 的辨识精度越高。换句话说,越靠近中心点的数据点获得的权重越大。因此,这里定义接触权重,用以考虑空间位置对数据获取影响以及对辨识结果的贡献。

在神经网络模型中,激活函数给神经元引入了非线性因素,使得神经网络可以任意逼近任何非线性函数。这里拟采用 Sigmoid 函数用以确定权重函数,有:

$$w_s(\varphi) = 1/(1 + e^{-\varphi}) \quad (19)$$

该函数能够将任意形函数 φ 映射到(0, 1)的范围之

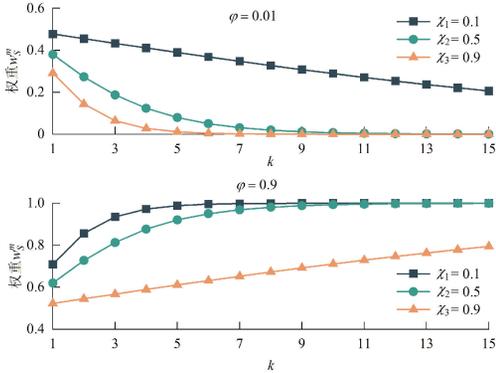
内。且在 $\varphi \rightarrow \infty$ 有 $w_s = 1$ 。但式(7)中的形函数取值范围为 $[0, 1]$,且在接触域中心点处有 $\varphi = 1$,此时权重 $w_s \cong 0.731$ 。显然式(19)无法满足靠近接触域中心数据权重取最大值1的要求。因此,本文提出改进 Sigmoid 函数,即:

$$w_s^m(x, y) = 1 / \{1 + e^{-k \cdot [\varphi(x, y) - \chi]}\} \quad (20)$$

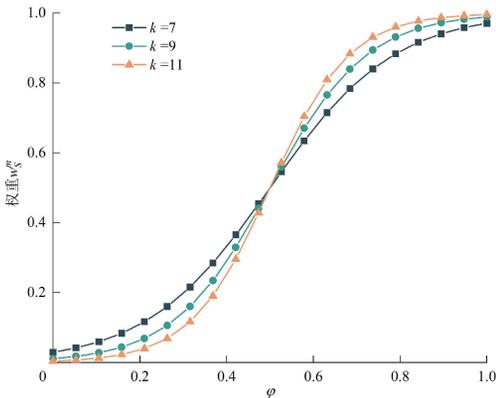
式中: k 为斜率,且有 $k > 1$; χ 为偏移量。

尽管形函数在理论上可以取得极小值0和极大值1,受限于阵列压力传感器分辨率,实际形函数极值存在一定偏差。为了检验式(20)中权重函数各参数对极值的影响,这里选取的测量单元位于接触域边界和中心附近,并设定 $\varphi_1(x, y) = 0.01$ 和 $\varphi_0(x, y) = 0.99$,则在不同偏移量下参考 k 与权重的关系如图3(a)所示。

从图3(a)中可以发现,在偏移量 χ 一定的情况下,当测量单元靠近接触域边界时(此时 $\varphi_1(x, y) = 0.01$),参数 k 与权重 w_s^m 呈现负相关性。且偏移量 χ 越大,权重 w_s^m 越容易趋近于0。而当测量单元位于接触中心时(此时 $\varphi_0(x, y) = 0.99$),斜率 k 与权重 w_s^m 呈正相关性,偏移量越小,权重 w_s^m 越容易趋近于1。综合考虑,当偏移量



(a) 形函数取值时权重与 k 的关系
(a) Relationship between weighting factor and k when the shape function attains extremum



(b) 不同 k 下权重与形函数的关系
(b) Relationship between weighting factor and shape function for varying values of k

图3 权重与权重函数参数之间的关系

Fig. 3 Relationship between weighting factors and parameters of the weight function

$\chi_2 = 0.5$ 时,权重 w_s^m 能够满足同时在接触域边界和中心处时取到极值。进一步,在此条件下,探索不同斜率 k 下权重 w_s^m 与形函数 φ 的关系。这里从图3(a)选取3组 k 值进行比对。如图3(b)所示,参数 k 越大,测量单元越容易在接触域边界和中心处获得极小权重和极大权重。在后续的计算中选用 k 值为9。

(2) 修正因子求解

由式(8)可以观察到,在整个接触碰撞全过程中,压力分布是四维数据,即任意时刻压力分布在接触域上的三维特征,又具有时间尺度上的变化特征,包括接触域大小的变化,同时也包括压力数值的变化。这里通过时空分离思想,在任意时刻下,分布力是一个空间分布函数,即此时每个数据点都满足于该分布函数。这时分布函数的特征参数为常值,即最大压力和接触系数是恒定的。观察式(13),此方程是典型的含截距的线性回归,这时定义每个数据点的残差为:

$$e_{u,v} = p_{u,v} - \hat{p}_{u,v} \quad (21)$$

采用改进 Sigmoid 权重函数的 S 形加权最小二乘算法(s-shaped weighted least squares, S-WLS)进行优化,则加权残差为:

$$w_{u,v}^m e_{u,v} = w_{u,v}^m (p_{u,v} - \hat{p}_{u,v}) \quad (22)$$

加权平方误差的优化目标函数为:

$$\operatorname{argmin} \| w_{u,v}^m (p_{u,v} - \hat{p}_{u,v}) \|^2 \quad (23)$$

最后回归结果为:

$$\begin{bmatrix} \ln(\tilde{p}_{\max,t}) \\ \tilde{\beta}_t \end{bmatrix} = (\Phi^T \mathbf{W} \Phi)^{-1} \Phi^T \mathbf{W} \mathbf{p}_z \quad (24)$$

根据式(8),可得修正后的接触域值为:

$$\tilde{\varphi}_t(x_u, y_v) = \left(\frac{p_{z,t}(x_u, y_v)}{\tilde{p}_{\max,t}} \right)^{1/\tilde{\beta}_t} \quad (25)$$

假设接触域离心率不变,定义修正因子为 α ,则:

$$\alpha = \frac{1}{n} \sum \left[\frac{\varphi_t(x_u, y_v) - 1}{\tilde{\varphi}_t(x_u, y_v) - 1} \right]^{1/2} \quad (26)$$

此时修正后的长短轴为:

$$\begin{cases} a_m = \alpha \cdot \frac{\max(l_1, l_2)}{2} \\ b_m = \alpha \cdot \frac{\min(l_1, l_2)}{2} \end{cases} \quad (27)$$

1.5 时空耦合下的递推求解

定义回归向量 Φ_k^T 和待辨识的参数矩阵 θ_k 分别为:

$$\begin{cases} \Phi_k = [1, \ln(\varphi_t(x_u, y_v))]^T \\ \theta_k = [\ln(p_{\max,t}), \beta_t]^T \end{cases} \quad (28)$$

依据式(13),可以得到分布力的标准方程为:

$$y_k = \Phi_k^T \theta_k + \varepsilon_k, \quad \varphi_k > 0 \quad (29)$$

式中: $y_k = \ln[p_{z,t}(x_u, y_v)]$; ε_k 表示第 k 时间步的综合误差。

考虑到分布力是一个动态测量过程,即需要实时进行参数更新,这里参考文献[29]中递推方程,同时兼顾测量单元在接触域的空间位置权重影响,给出包含遗忘因子和权重因子的时空耦合的递推式,即:

$$\begin{cases} \mathbf{K}_k = \frac{\mathbf{P}_{k-1} \Phi_k}{\lambda_0 + \Phi_k^T \mathbf{P}_{k-1} \Phi_k} \\ \mathbf{P}_k = \frac{1}{\lambda_0} [\mathbf{P}_{k-1} - \mathbf{K}_k \Phi_k^T \mathbf{P}_{k-1}] \\ \hat{\boldsymbol{\theta}}_k = \hat{\boldsymbol{\theta}}_{k-1} + \mathbf{K}_k [w_k \cdot (y_k - \Phi_k^T \hat{\boldsymbol{\theta}}_{k-1})] \end{cases} \quad (30)$$

式中: \mathbf{P} 是协方差矩阵; λ_0 是遗忘因子。

则最后的分布力参数辨识结果表示为:

$$\begin{cases} \hat{\rho}_{\max,k} = e^{\hat{\theta}_k(1)} \\ \hat{\beta}_k = \hat{\theta}_k(2) \end{cases} \quad (31)$$

2 实验验证

2.1 实验装置简介

机械柔性消旋通常是在消旋平面内的多次接触冲击事件^[10,30],这表明重复平面冲击实验可以模拟这一接触过程。所谓消旋平面是垂直于空间碎片最大主惯性轴的平面,在此平面内施加消旋碰撞力/力矩能够实现目标角动量和动能的衰减。因此,设计并制造了一个等效微重力碰撞平台(如图4所示),以模拟ARD任务期间服务卫星与空间碎片之间的接触碰撞。该装置主要包括大理石平台、空间碎片模拟器、冲击末端执行器和数据采集系统。空间碎片模拟器底部安装有3个气足,利用高压气瓶供气,漂浮在大理石平台上实现微重力环境模拟。模拟器具有平面三自由度,能够真实反应在受到碰撞冲击后不确定性的漂浮运动。通过调整空间碎片模拟器和冲击末端执行器的相对位置,满足不同冲击速度和方向的碰撞工况模拟。

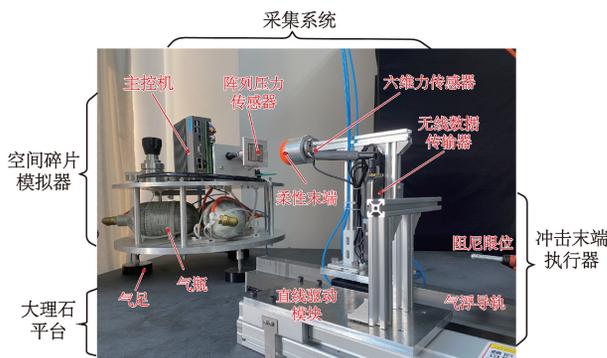


图4 微重力碰撞实验平台

Fig. 4 Microgravity collision experiment platform

1) 阵列压力测量

阵列压力传感器采用定制的高密度分布式柔性压力

传感器,其主要性能参数如下:供电3~5 V,量程为0~1 025 kPa,精度为 $\pm 0.5\%$ FS,迟滞性为0.1% FS,零点漂移 $\pm 0.01\%$ FS/ $^{\circ}\text{C}$ 。采用16行16列阵列式设计,拥有256个独立感应单元,单元分辨率1.9 mm²,总感应大小40 mm \times 40 mm。在使用时将其固定在模拟器撞击接触的平面上。数据采集卡为研华公司的PCI-1716高分辨率多功能采集卡,带有一个250 KS/s的16位A/D转换器,一个1 K的A/D采样FIFO缓冲器。并具备16路单端模拟量输入的能力,最大采样频率为500 kHz。主控机为MIC-7700嵌入式工控机,具有4个RS-232/422/485串口和2个1 000 Mbps网络适配器。其处理器为Intel[®] Croe[™] i7-6700 CPU@ 4.0 GHz 8 G DDR4。

如图5所示,设计了多通道的分布力采集电路,以避免阵列压力传感器行、列电极之间的干扰。该电路利用一个16通道模拟开关和一个采集卡。模拟开关由主控机供电和控制。其J1-B端口与阵列压力传感器的J1-A端口相连。阵列压力传感器的J2-A端口通过J2-B2端口与一个16路电阻器串联。此外,它还通过J2-AB适配器端口与采集卡的J2-B1端口相连。采集过程为主控机向模拟开关供电,采集卡将16路模拟信号转换为数字信号,主控机完成数据收集。

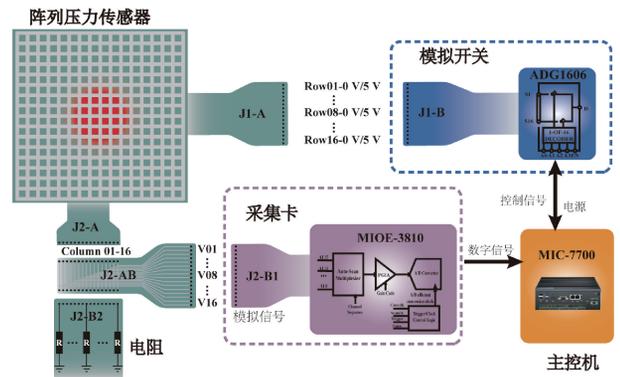


图5 阵列压力数据采集

Fig. 5 Schematic of array pressure data acquisition

2) 集中力测量

为了观测碰撞过程和时间历程,实验中对碰撞力进行了采集。如图4所示,冲击末端执行器由柔性末端、六维力传感器、无线数据传输器、直线驱动模块、气浮导轨和阻尼限位组成。柔性末端固定在六维力传感器上,传感器安装在冲击末端的基座上。基座与气浮导轨的气浮滑块相连。阻尼限位安装在气浮导轨的末端位置,用于限制冲击末端发生碰撞后滑出气浮导轨,并吸收碰撞后残余动能。六维力传感器选用ATI公司mini45力传感器,其单轴最大测力范围为1 160 N,可以满足不同条件下对冲击力的采集要求。无线数据传输器与mini45力传感器配套使用,无线传输可避免冲击末端在碰撞过

程中受到电缆干扰。而且它的采样精度达到 32 位、采样频率高达 4 kHz, 能满足采样要求。

3) 实验流程及数据收集

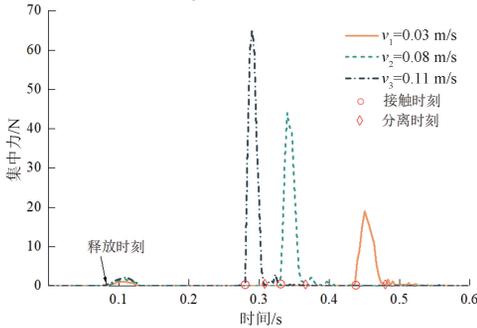
实验流程: 直线驱动模块推动气浮导轨上的基座。到达释放点后, 直线驱动模块停止, 基座依靠惯性向前滑动, 直到与目标发生碰撞反弹。在此过程中, 安装在柔性末端和基座之间的六维力传感器采集接触集中力, 并通过无线传输器将数据包传输到主控机。同时, 阵列压力传感器也将测量单元测得的分布力经采集卡传输至主控机。由于该装置为缩比模型, 安装气浮导轨上的部件迎风面小, 且冲击速度相对较小, 因此风阻被忽略。鉴于地面碰撞实验持续的时间较短, 且采用了高性能传感器, 因此忽略了常温环境下温度变化对测量结果的影响。参照文献[10]确定实验参数如表 1 所示。

表 1 实验参数

Table 1 Experimental parameters

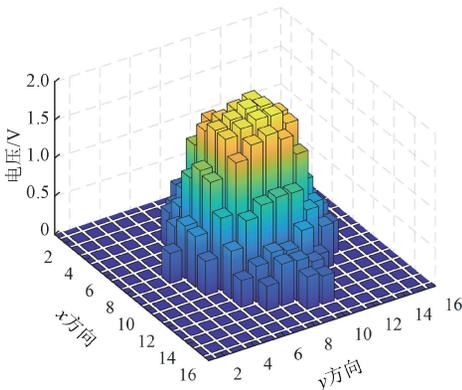
材料	直径/m	初速度/(m·s ⁻¹)	斜碰角度/rad
硅橡胶	0.05	0.03/0.08/0.11	$\pi/3$

图 6 显示在不同碰撞速度下的碰撞集中力和部分阵列压力传感器测量结果。



(a) 不同速度下的碰撞集中力数据

(a) Collision concentrated force data under different velocities



(b) $t=0.35$ s 时刻 v_2 速度下降列压力传感器测量结果
(b) Measurement results of the array pressure sensor at velocity v_2 when $t=0.35$ s

图 6 接触/撞击实验部分测量结果

Fig. 6 Partial measurement results of contact/impact test

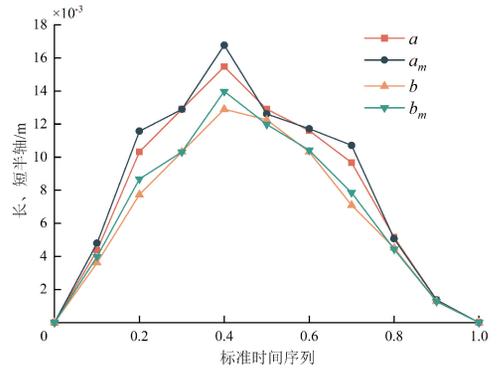
图 6(a) 中的曲线保留了整个碰撞周期集中力变化规律。该过程包括了冲击开始、滑行阶段、接触压缩阶段和接触恢复阶段。接触力呈现了先增大后减小的趋势。本文测得集中力在接触压缩阶段的变化与文献[31]中通过摆锤法得到的相似。但摆锤法受其轨迹和离心力的限制, 无法反映恢复阶段的集中力变化, 本文的实验方案克服了这一缺陷。

2.2 结果讨论和分析

本节将利用 2.1 节阵列压力数据进行辨识处理。在接触域几何参数辨识上, 与普通加权最小二乘法 (weighted least squares, WLS) 进行了对比。在分布力特征参数辨识上, 与 Hertz 接触结果进行了对比。最后利用统计学分析方法对辨识结果误差进行了检验和分析。

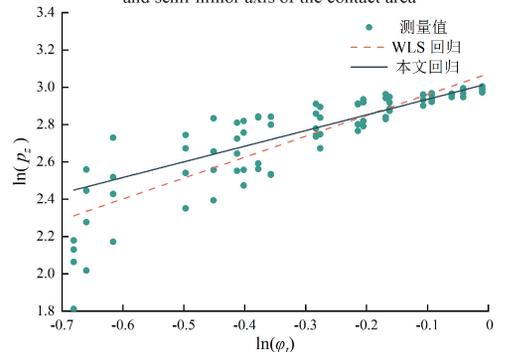
1) 接触域修正与分析

图 7 给出了斜碰情况下接触域几何参数修正和分布力特征参数辨识结果。需要说明的是为了避免样本的时间尺度不均匀性, 这里横坐标轴采用了无量纲标准时间序列进行处理。无量纲标准时间序列是通过将接触时间归一化为从 0 ~ 1 范围内, 其数值表示当前数据在整个碰撞接触过程中的序列位置。



(a) 接触域长、短半轴搜寻结果

(a) Search results for the semi-major axis and semi-minor axis of the contact area



(b) 接触域修正因子回归结果

(b) Regression results of contact area correction factor

图 7 接触域几何参数搜寻及修正因子回归

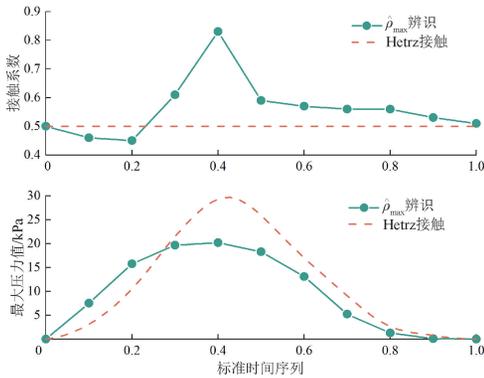
Fig. 7 Identification of contact area geometric parameters and regression of correction factors

从图 7(a) 中可以观察到接触域长、短半轴修正前后,其趋势均为先增大后减小,反应了柔性末端在一次接触碰撞过程的压缩和恢复。在整个接触周期内,长半轴最大修正值为 1.29 mm,短半轴最大修正值为 1.07 mm,这主要是因为 NRRSA 搜寻算法采用测量单元中心点坐标计算造成的。即本研究对接触域参数的修正弥补了传感器感应单元分辨率的影响。

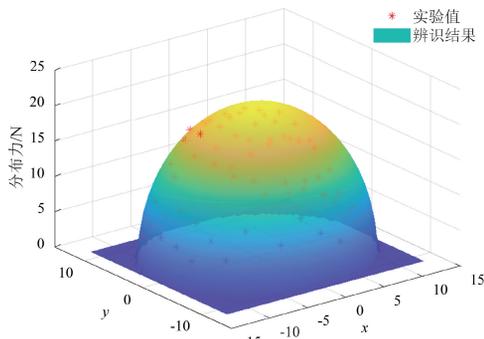
考虑到回归方程为幂指数函数,图 7(b) 给出分布力测量数据在对数空间坐标上的分布,以及本文回归线和 WLS 回归线。其中 x 坐标越大,代表该测量单元越靠近接触域中心。回归线的斜率为接触系数,截距为最大压力估计值的对数。从回归线来看,基于改进 Sigmoid 函数获得权重相较于普通加权方法,回归线更依赖于靠近接触域中心的数据,降低了边界噪声对回归的影响。

2) 分布力辨识结果讨论

根据接触力学理论,在满足 Hertz 接触的分布力中,接触系数为常值 0.5。而椭圆分布取值为 1^[28]。在柔性末端接触碰撞中,可以观察到接触系数具有时变性,其规律为先增大后减小(如图 8(a) 所示)。



(a) Identification results of distributed force parameters



(b) Experimental comparison of distributed force identification results in the spatial domain

图 8 分布力特征参数辨识结果及实验对比

Fig. 8 Identification results of distributed force characteristic parameters and experimental comparison

在初始压缩阶段和恢复最后阶段,接触系数在 0.5 附近,此时接触界面的压缩变形量小,使得接触域和最大压力值也较小。而当压缩达到最大时,最大压力变化平缓,接触系数靠近 1,这是因为柔性末端的变形为大变形,接触面的几何特征发生较大变化,已无法满足 Hertz 接触条件,分布趋向椭圆。由于分布力具有时空复杂变化特性,图 8(b) 展示了 0.4 序列下分布力在空间坐标系下的辨识结果与实验测得结果。其中拟合曲面结果为接触域修正后获得参数辨识代入方程所得。可以发现得到的曲面能够很好的包络实验测得结果。对接触域内各样本点残差进行统计并计算相对误差(如图 9 所示)。从图中可以看出相对误差区间为 $[-8.8\%, 8.8\%]$,且相对误差较大的观测点均靠近接触域边界,这主要是受到阵列压力传感器边界噪声的影响。进一步考虑到靠近接触域中心和边界的测量单元压力数值差异较大,为避免尺度效应引起较大的误差差异,这里选用相对误差进行正态分布检验(如图 10 所示),采用 Hazen 计分方法,置信水平为 95%,检验结果获得如图所示。从分位数-分位数图(quantile-quantile plot, Q-Q) 中可以发现相对误差的分位数和正态分布的分位数沿对角线排列分布,说明相对误差服从正态分布,即验证验证了模型的误差假设。

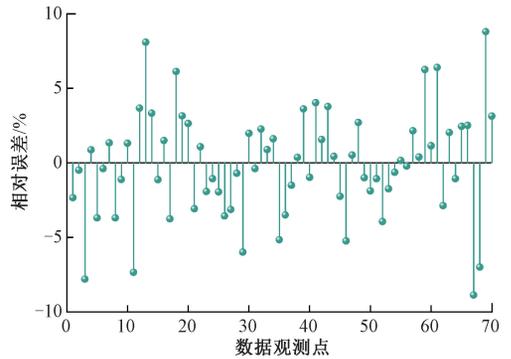


图 9 分布力辨识结果相对误差

Fig. 9 Diagram of relative errors in distributed force identification results

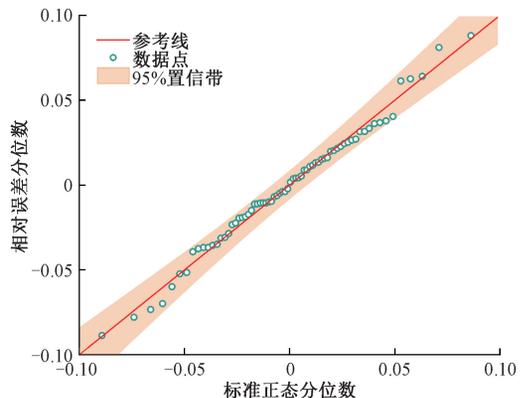


图 10 分布力相对误差 Q-Q 图检验

Fig. 10 Q-Q test of relative error for distributed force

3 结 论

本研究提出了一种基于阵列压力传感器的嵌套式递推分布力辨识方法,用于精确辨识合作目标消旋捕获中的动态时变分布力。该方法通过改进的 Sigmoid 函数和引入遗忘因子、权重因子构建新的求解递推式,即克服了传统辨识算法对传感器感应单元分辨率的依赖,又有效捕捉了分布力参数在碰撞全过程中的时序关联性和空间差异性。此外,设计了基于压力传感器的分布力采集系统,并研制了等效微重力碰撞平台。克服了摆锤法的局限性,成功获取了碰撞全过程的接触物理参数数据。斜碰实验结果表明,柔性末端在碰撞接触的压缩开始和恢复结束阶段,接触类型符合 Hertz 接触分布;而在最大压缩量时,接触类型趋近于椭圆分布,表现出与刚性碰撞显著不同的特征。通过正态性检验,验证了所提方法的有效性。综上,本研究为地面模拟和空间消旋/捕获任务提供了有效的理论和技术支持。

参考文献

[1] 王文龙, 杨建中. 航天器对接与捕获技术综述[J]. 机械工程学报, 2021, 57(20): 215-231.
WANG W L, YANG J ZH. Spacecraft docking & capture technology: Review[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(20): 215-231.

[2] BARANOV A A, GRISHKO D A. Review of path planning in prospective multi-target active debris removal missions in low earth orbits[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2024, 145: 100982.

[3] YANG J N, HOU X L, LIU Y, et al. A two-level scheme for multiobjective multidebris active removal mission planning in low Earth orbits[J]. Science China Information Sciences, 2022, 65(5): 152201.

[4] RYBUS T. Robotic manipulators for in-orbit servicing and active debris removal: Review and comparison [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2024, 151: 101055.

[5] ZHANG ZH P, YU ZH W, ZHANG Q W, et al. Dynamics and control of a tethered space-tug system using takagi-sugeno fuzzy methods[J]. Aerospace Science and Technology, 2019, 87: 289-299.

[6] YU Y F, YUE H H, YANG F, et al. Electromagnetic interaction between a slowly rotating conducting shell and magnetic dipoles: A theoretical and numerical study[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2021, 57(8): 6302311.

[7] 王宏伟, 代洪华, 陈昊, 等. 耦合扰动下空间翻滚目标的接触消旋输出反馈控制[J]. 宇航学报, 2023, 44(10): 1564-1574.

WANG H W, DAI H H, CHEN H, et al. Output feedback control of contact detumbling for tumbling targets in space under coupling disturbance[J]. Journal of Astronautics, 2023, 44(10): 1564-1574.

[8] ALVES J, PEIXINHO N, DA SILVA M T, et al. A comparative study of the viscoelastic constitutive models for frictionless contact interfaces in solids[J]. Mechanism and Machine Theory, 2015, 85: 172-188.

[9] LIU J, CHEN CH, YU J Y, et al. Unmanned aerial vehicle strike on a flat plate: Tests and numerical simulations[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2023, 36(4): 286-298.

[10] PENG S Q, ZHANG H B, QI CH Q, et al. Impact pressure distribution recognition for large non-cooperative target in ground detumbling experiment[J]. Aerospace, 2022, 9(5): 226.

[11] 张龙赐, 周国方, 蓝镇立. 钛合金纳米薄膜压力传感器非线性及灵敏度研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(8): 153-159.
ZHANG L C, ZHOU G F, LAN ZH L. Study for the nonlinearity and sensitivity of the titanium alloy nano film pressure sensor[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(8): 153-159.

[12] 黄臻, 于随然. 基于压力传感阵列的低成本高性能睡眠质量监测系统[J]. 电子测量技术, 2023, 46(19): 14-20.
HUANG ZH, YU S R. Low-cost high-performance sleeping posture monitoring system based on pressure sensing array[J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(19): 14-20.

[13] LI T L, ZHANG AO, DU M CH, et al. A fingertip optical fiber composite sensor with conformal design for robotic perception of tactile force [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 2024, 9: 1-13.

[14] YUAN W ZH, DONG S Y, ADELSON E H. Gelsight: High-resolution robot tactile sensors for estimating geometry and force[J]. Sensors, 2017, 17(12): 2762-2783.

[15] ZHENG L. Learning the signatures of the human grasp using a scalable tactile glove [J]. Journal of Semiconductors, 2019, 40(7): 070202.

[16] XIA Y J, HUANG P J, LIN X M, et al. The piezoresistive pressure sensors with elastic graphene-coated silicone spheres[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics. 2024, 35(18): 1235.

[17] SUN H CH, ZHANG ZH J, JIN X, et al. Monitoring driving psychological fatigue through unconstrained heartbeat signal extraction by using pressure sensor

- array[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 22193-22202.
- [18] ZHANG Z M, ZHANG Y X, JIANG X, et al. Simple and efficient pressure sensor based on PDMS wrapped CNT arrays[J]. *Carbon*, 2019, 155: 71-76.
- [19] RAMIREZ W A, LEONG Z Q, NGUYEN H D, et al. Machine learning post processing of underwater vehicle pressure sensor array for speed measurement[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 213: 107771.
- [20] RAN X, WANG C, XIAO Y, et al. A portable sitting posture monitoring system based on a pressure sensor array and machine learning[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2021, 331: 112900.
- [21] MAO Y Y, JI B, CHEN G, et al. Robust and wearable pressure sensor assembled from AgNW-coated PDMS micropillar sheets with high sensitivity and wide detection range[J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2019, 2(5): 3196-3205.
- [22] 刘泽朝, 李敬兆, 郑昌陆, 等. 基于DFRLS-AUKF的单轨吊车动态倾角辨识方法研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2024, 38(2): 101-111.
LIU Z CH, LI J ZH, ZHENG CH L, et al. Dynamic inclination angle of monorails crane based on DFRLS-AUKF research on identification method[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2024, 38(2): 101-111.
- [23] 张凯, 单甘霖. 基于高斯和与SCKF的非线性非高斯滤波算法[J]. *仪器仪表学报*, 2014, 35(11): 2524-2530.
ZHANG K, SHAN G L. Nonlinear non-Gaussian filtering algorithm based on Gaussian sum filter and SCKF[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(11): 2524-2530.
- [24] 周民瑞, 周振华, 刘鑫, 等. 压电执行器的非对称动态迟滞特性建模研究[J]. *仪器仪表学报*, 2022, 43(4): 108-120.
ZHOU M R, ZHOU ZH H, LIU X, et al. Modeling of asymmetric dynamic hysteresis characteristics of piezoelectric actuator[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2022, 43(4): 108-120.
- [25] 段震宇, 文玉梅, 叶敬昌, 等. 调制式海洋电场传感输出噪声抑制[J]. *仪器仪表学报*, 2024, 45(10): 234-243.
DUAN ZH Y, WEN Y M, YE J CH, et al. A noise suppression method for modulated electric field sensors[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2024, 45(10): 234-243.
- [26] MIN K, CHOI H, CHO K J, et al. Single to multi-Data-driven high resolution calibration method for piezoresistive sensor array [J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2021, 6(3): 4970-4977.
- [27] YE J H, LIN ZH K, HUANG SH H, et al. A flexible touch-sensing sensor based on the theory of non-uniform gradient potential distribution[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 20(7): 3396-3405.
- [28] JOHNSON K L. *Contact mechanics* [M]. Cambridge University Press, 1985.
- [29] HADDADI A, HASHTRUDI-ZAAD K. Real-time identification of hunt-crossley dynamic models of contact environments [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2012, 28(3): 555-566.
- [30] MA Z Q, LIU ZH Y, ZOU H W, et al. Dynamic modeling and analysis of satellite detumbling using a brush type contactor based on flexible multibody dynamics[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2022, 170: 104675.
- [31] MA J, DONG SH, CHEN G S, et al. A data-driven normal contact force model based on artificial neural network for complex contacting surfaces[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 156: 107612.

作者简介



齐超群, 2015年于河北工业大学城市学院获得学士学位, 现为河北工业大学机械工程学院博士研究生, 主要研究方向为智能机器人动力学与控制。

E-mail: qcq911@163.com

Qi Chaoqun received his B.Sc. degree in 2015 from Hebei University of Technology City College. Now he is a Ph.D. candidate at the School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology. His main research interests include dynamics and control of intelligent robots.



张慧博(通信作者), 2009年于哈尔滨工程大学获得学士学位, 分别于2011年和2015年在哈尔滨工业大学获得硕士学位和博士学位, 现为哈尔滨工程大学教授, 主要研究方向为机构动力学与控制的基础理论与工程应用研究。

E-mail: /zhanghuibo@hrbeu.edu.cn

Zhang Huibo (Corresponding author) received his B.Sc. degree in 2009 from Harbin Engineering University, received his M.Sc. and Ph.D. degrees from Harbin Institute of Technology in 2011 and 2015, respectively. Now he is a professor in Harbin Engineering University. His main research interests include the basic theory and engineering application of mechanism dynamics and control.