

## 基于拓展社会力的机器人柔顺跟随与避障控制

彭建伟<sup>1,2</sup>, 廖哲霖<sup>1,3</sup>, 姚瀚晨<sup>1,2</sup>, 万邳珺<sup>1,4</sup>, 朱利琦<sup>1</sup>, 戴厚德<sup>1,2\*</sup>

(1. 中国科学院 福建物质结构研究所, 福建 福州 350002; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;  
3. 福建农林大学, 福建 福州 350002; 4. 福州大学 先进制造学院, 福建 晋江 362200)

**摘要:** 人机共融是新一代机器人的重要特征。针对跟随型移动机器人在人机共融环境中的跟随与避障控制问题, 提出一种基于拓展社会力模型的柔顺跟随与避障控制策略。基于阻抗控制设计可同时控制人机交互力和位置偏差的跟随控制器, 实现了移动机器人的柔顺跟随。考虑“人-机器人-障碍物”三者的交互作用, 基于拓展社会力模型和空间关系学设计人机友好的柔顺跟随避障控制策略, 有效解决跟随机器人的避障问题, 同时保障了人的舒适性, 提升了跟随机器人的社会接纳度。仿真结果表明: 该策略可以实现人机友好的柔顺跟随避障控制。

**关键词:** 人机共融; 人机跟随; 柔顺控制; 阻抗控制; 拓展社会力模型; 空间关系学; 避障

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2023)08-1776-12

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.22-0454

**引用格式:** 彭建伟, 廖哲霖, 姚瀚晨, 等. 基于拓展社会力的机器人柔顺跟随与避障控制[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(8): 1776-1787.

**Reference format:** Peng Jianwei, Liao Zhelin, Yao Hanchen, et al. A Compliant Robot Control Based on Extended Social-force Model for Human-following and Obstacle Avoidance[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(8): 1776-1787.

### A Compliant Robot Control Based on Extended Social-force Model for Human-following and Obstacle Avoidance

Peng Jianwei<sup>1,2</sup>, Liao Zhelin<sup>1,3</sup>, Yao Hanchen<sup>1,2</sup>, Wan Zhiyu<sup>1,4</sup>, Zhu Liqi<sup>1</sup>, Dai Houde<sup>1,2\*</sup>

(1. Fujian Institute of Research on the Structure, Chinese Academy of Sciences, Fuzhou 350002, China;  
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China;  
4. School of Advanced Manufacturing, Fuzhou University, Jinjiang 362200, China)

**Abstract:** Human-robot coexisting is an essential feature of the next generation mobile robot. A compliant robot control strategy based on the extended social-force model for human-following and obstacle avoidance in coexisting-cooperative-cognitive environment is presented. The human-following controller based on impedance control can simultaneously adjust human-robot interaction force and position deviation to carry out the compliant human-following of mobile robots. Considering human-robot-obstacle interactions, based on the extended social-force model and proxemics, a control strategy for human-friendly compliant human-following and obstacle avoidance is designed to solve the obstacle avoidance problem of robot and ensure the human comfort and improving the social acceptance of robot simultaneously. Simulation results show that the proposed control strategy can realize human-friendly compliant human-following and obstacle avoidance.

**Keywords:** coexisting-cooperative-cognitive; human-following robots; compliant control; impedance control; extended social-force model; proxemics; obstacle avoidance

收稿日期: 2022-05-05 修回日期: 2022-06-13

基金项目: 中央引导地方科技发展专项资金(2020L3028, 2021L3047); 中国科学院对外合作重点项目(121835KYSB20190069)

第一作者: 彭建伟(1997-), 男, 硕士生, 研究方向为移动机器人运动控制与人机交互。E-mail: pengjianwei20@mails.ucas.ac.cn

通讯作者: 戴厚德(1982-), 男, 研究员, 博导, 博士, 研究方向为移动机器人感知与控制、智能传感与嵌入式系统。E-mail: dhd@fjrsim.ac.cn

## 0 引言

人机共融是应对工业、民生、特种服务等领域需求的新一代机器人的重要特征<sup>[1]</sup>。而人机跟随是人机共融系统的基础问题之一,其典型应用是跟随机器人。全球面临新冠病毒长期流行、人口老龄化日益严重等挑战,社会医疗资源紧张,劳动力成本不断攀升,跟随机器人在医疗陪护<sup>[2-3]</sup>、助老助残<sup>[4-5]</sup>、物流搬运<sup>[6-7]</sup>等领域具有广泛的应用前景,能有效帮助缓解社会医疗资源紧张和劳动力成本不断攀升等问题。因此,人机跟随逐渐成为研究热点<sup>[8]</sup>。

跟随型移动机器人是一种能够在人机共享动态环境下实时检测跟踪目标,并对目标进行跟随的机器人。现有的研究中大多集中于目标检测跟踪,跟随控制策略方面的研究较少,而实现人机共融环境下人机安全友好交互,则必须通过控制算法才能实现。

在人机跟随控制策略方面,孙月等<sup>[9]</sup>采用PID控制算法设计了机器人与跟随目标的相对距离和相对方向角控制器,并设计了舒适性跟随模型实现对人的舒适跟随,但缺陷是PID中的误差积分反馈会使闭环变得迟钝,且容易引起信号振荡。Jia等<sup>[10]</sup>采用模糊控制,基于跟随距离、跟随角度和机器人速度设计了速度和转向增益控制器,通过2个模糊控制器可实现自适应调整跟随速度和转向增益。然而,该方法精度较低,鲁棒性较差的缺点使其难以在多人动态场景下实施。Nakazawa等<sup>[11]</sup>采用人工势场法设计控制策略,在目标和障碍物位置分别构建吸引势场和排斥势场,通过势场合力的作用实现人机跟随,同时避开障碍,但该方法容易造成死锁现象,使机器人在局部极小值的区域停滞或失控。Sekiguchi等<sup>[12]</sup>采用模型预测控制,结合空间关系学设计了一种与人友好的跟随控制策略,但是缺陷是容易出现控制输出不可行的问题,造成控制输入不收敛。上述方法均通过单一的位置或速度控制方式来实现跟

随,无法实现人机交互系统的柔顺控制以及对人的舒适跟随。

人机跟随舒适性是指跟随机器人不侵犯人的社交舒适区,防止出现由于跟随距离太近而引起人的情绪不适,该距离也可避免机器人与人的碰撞。根据Hall的空间关系学,人的社交区域由里向外划分为亲密区域(0~0.46 m)、私人区域(0.46~1.22 m)、社交区域(1.22~3.66 m)和公共区域(>3.66 m)4种<sup>[13]</sup>。为了满足人机跟随舒适性要求,跟随机器人应处于社交区域或者公共区域<sup>[14]</sup>。

阻抗控制是一种经典的人机交互控制方法,其核心思想是基于“质量-阻尼-弹簧”的二阶微分方程来描述机器人与环境的交互力和机器人位移的动态关系,通过对力和位置的控制来实现机器人的柔顺控制<sup>[15-17]</sup>。陈靛等<sup>[18]</sup>设计了基于阻抗模型的下肢康复机器人交互控制系统,加强了下肢康复机器人对下肢主动柔顺性,提升了患者的舒适性。Morioka等<sup>[19]</sup>提出了虚拟弹簧模型用于分布式智能环境下的人机跟随控制,该模型能够有效吸收人与机器人之间的运动差异,实现人机之间的柔顺交互。姚瀚晨等<sup>[20]</sup>在Morioka的虚拟弹簧模型上进行改进,将弹簧阻尼特性添加到障碍中,以实现跟随避障功能,但上述研究没有考虑到被跟随目标人的舒适性问题。Herrera等<sup>[21]</sup>提出基于虚拟社会力和阻抗控制的跟随控制策略,在目标人的社交舒适区构建排斥型虚拟社会力场以避免机器人侵犯该区域,提升了人的舒适性,但该方法忽略了共融环境中其他行人的舒适性和跟随机器人的避障问题。

针对上述问题,本文提出一种基于拓展社会力模型的柔顺跟随避障控制策略。通过建立人机交互力和跟随位置误差之间的动态关系,设计了基于阻抗控制的跟随控制器,实现机器人对目标人的柔顺跟随。基于拓展社会力模型和社交空间理论,建立了人机共融环境下“人-机器人-障碍物”三者之间的交互作用关系,在阻抗控制器基础上设计了与人友好的跟随避障控制策略,解决

了机器人跟随运动过程的避障问题，同时保障了目标人和其他行人的舒适性，提升了跟随机器人的社会接纳度。

## 1 跟随型移动机器人模型

### 1.1 运动学模型

将移动机器人建模为一个在二维平面内运动的刚体， $X_w O Y_w$ 和 $X_R O Y_R$ 分别为惯性坐标系和机器人坐标系。两轮差速移动机器人系统模型如图1所示， $d$ 是机器人轮轴中心与机器人形心的距离， $r$ 是驱动轮半径， $L$ 是2个驱动轮的轴距， $Q$ 是轮轴中心， $G$ 是机器人形心。在惯性坐标系中定义机器人形心坐标 $(x_r, y_r, \theta_r)$ 作为机器人实际位置， $(x_q, y_q, \theta_q)$ 为机器人轮轴中心坐标。

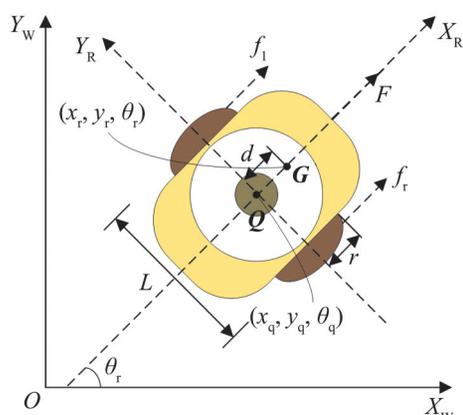


图1 两轮差速移动机器人系统模型

Fig. 1 Model schematic of a two-wheel differential mobile robot

假设机器人不发生侧滑，即受到非完整约束，根据非完整移动机器人的运动特点，可得机器人轮轴中心 $Q$ 的运动方程：

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_q \\ \dot{y}_q \\ \dot{\theta}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_q & 0 \\ \sin \theta_q & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中： $v$ 和 $\omega$ 分别为机器人的线速度和角速度。

左右驱动轮的转动角速度分别设定为 $\delta_1$ 和 $\delta_2$ ，则机器人速度与驱动轮角速度存在如下关系：

$$\begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r}{2}(\delta_1 + \delta_2) \\ \frac{r}{L}(\delta_1 - \delta_2) \end{bmatrix} \quad (2)$$

机器人形心与轮轴中心的位置存在如下关系：

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_r \\ \dot{y}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x}_q + d\dot{\theta}_r \sin \theta_r \\ \dot{y}_q - d\dot{\theta}_r \cos \theta_r \end{bmatrix} \quad (3)$$

将式(1)代入式(3)，可得移动机器人的运动学方程：

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_r \\ \dot{y}_r \\ \dot{\theta}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_r & d \sin \theta_r \\ \sin \theta_r & -d \cos \theta_r \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (4)$$

### 1.2 动力学模型

图1中 $f_l$ 和 $f_r$ 分别为左右2个驱动轮的驱动力， $F=f_l+f_r$ 是机器人的前进驱动力，建立移动机器人的力和力矩平衡方程：

$$\begin{cases} F = m\dot{v} = f_l + f_r \\ M = I\dot{\omega} = \frac{L(f_l - f_r)}{2} \end{cases} \quad (5)$$

式中： $m$ 为机器人的质量； $I$ 为机器人的转动惯量。

对于驱动轮的驱动电机，忽略电感上的电压，可得到驱动轮扭矩模型<sup>[22]</sup>：

$$\begin{cases} \tau_r = \frac{K_a(V_r - K_b\delta_r)}{R_a} \\ \tau_l = \frac{K_a(V_l - K_b\delta_l)}{R_a} \end{cases} \quad (6)$$

式中： $\tau_1$ 和 $\tau_2$ 为机器人左右轮的输出扭矩； $V_1$ 和 $V_2$ 为左右轮电机的输入电压； $K_a$ 为电机转矩常数和齿轮转动比的乘积； $K_b$ 为电机的电压常数和电机齿轮传动比的乘积； $R_a$ 为电阻常数。

假设移动机器人左右驱动轮的物理参数相同，可得驱动轮的力矩平衡方程：

$$\begin{cases} I_c\dot{\delta}_r + B_c\delta_r + f_r r = \tau_r \\ I_c\dot{\delta}_l + B_c\delta_l + f_l r = \tau_l \end{cases} \quad (7)$$

式中： $I_c$ 为驱动轮转动惯量； $B_c$ 为驱动轮阻尼系数。

通常工业中的电机大多使用PD控制器，可以

保证系统的渐进稳定性, 且容易实现<sup>[22]</sup>。在实际应用中电机以速度作为参考输入, 而不直接以电压作为输入来直接驱动电机。因此, 本文采用PD控制对电机控制模型进行简化:

$$\begin{bmatrix} V_v \\ V_\omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_p(v_d - v) - K_d\dot{v} \\ K_p(\omega_d - \omega) - K_d\dot{\omega} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中:  $V_v$ 和 $V_\omega$ 为电压控制信号, 与左右轮电压存在 $V_v = (V_l + V_r)/2$ ,  $V_\omega = (V_r - V_l)/2$ 关系;  $K_p$ 和 $K_d$ 分别为比例和微分增益;  $v_d$ 和 $\omega_d$ 分别为参考线速度和角速度;  $v$ 和 $\omega$ 为实际线速度和角速度。

基于式(2)、(4)~(8)可推导得到移动机器人的动力学模型:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_r \\ \dot{y}_r \\ \dot{\theta}_r \\ \dot{v} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v \cos \theta_r - d\omega \sin \theta_r \\ v \sin \theta_r + d\omega \cos \theta_r \\ \omega \\ -\frac{\psi_2}{\psi_1} v \\ \frac{\psi_4}{\psi_3} \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{\psi_1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\psi_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\psi_1 = \frac{mr^2 R_a + 2rK_a K_d + 2I_c R_a}{2rK_a K_p}$$

$$\psi_2 = \frac{rK_a K_p + K_a K_b + B_c R_a}{rK_a K_p}$$

$$\psi_3 = \frac{2r^2 I R_a + 2rL K_a K_d + L I_c R_a}{2rL K_a K_p}$$

$$\psi_4 = \frac{2rK_a K_p + L K_a K_b + B_c R_a}{2rK_a K_p}$$

## 2 人机友好的柔顺跟随控制策略

### 2.1 柔顺跟随控制目标

人机跟随控制本质上是控制机器人与被跟随目标保持一定的间距, 因此, 常用的跟随控制方法大多基于位置控制。但由于被跟随目标重心摆动和运动意图不可预测等因素, 纯粹的位置控制无法实现柔顺的人机交互控制, 难以确保跟随过程中人的安全性和舒适性。阻抗控制是一种典型的柔顺控制方法, 它使用一个“质量-阻尼-弹簧”模型的二阶微分方程来描述机器人与环境的交互

力和机器人位移的动态关系, 同时对位置和交互力进行控制, 使机器人在跟随过程具有柔性动态行为。

在人机共融环境中实现人机跟随还需考虑到“人-机器人-障碍物”这三者的交互作用对跟随机器人运动产生的影响。跟随机器人需要避开障碍和其他行人, 确保自身及行人安全, 同时为了提升机器人的人机友好特性, 还需避免侵犯其他行人的亲密区域和私人区域, 即跟随机器人只可在跟随目标人的社交区域或公共区域活动。考虑到跟随距离变大容易出现丢失目标的问题, 本文将机器人的跟随位置控制在目标人的社交区域中。

图2为人机共融环境中的人机跟随模型,  $\rho$ 为机器人的实际跟随距离,  $\rho_d$ 为机器人的期望跟随距离, 通过目标人的位姿 $(x_h, y_h, \theta_h)$ 和跟随机器人的实际位姿 $(x_r, y_r, \theta_r)$ 可以得到跟随机器人的跟随距离 $\rho = \sqrt{(x_r - x_h)^2 + (y_r - y_h)^2}$ 。定义障碍物的位置为 $(x_i^{ob}, y_i^{ob})$ , 其他行人的位置为 $(x_j^{op}, y_j^{op})$ , 其中 $i, j \in \mathbb{N}$ , 为了实现舒适安全的柔顺跟随可设计如下控制目标:

$$\begin{cases} d_{\text{personal}} \leq \lim_{t \rightarrow \infty} |\rho| = \rho_d \leq d_{\text{social}} \\ (x_r - x_i^{ob})^2 + (y_r - y_i^{ob})^2 \geq (d_{ob}^i)^2 \\ (x_r - x_j^{op})^2 + (y_r - y_j^{op})^2 \geq (d_{op}^j)^2 \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $d_{\text{personal}}$ 和 $d_{\text{social}}$ 分别为目标人的私人区域半径和社交区域半径;  $d_{ob}^i$ 为第 $i$ 个障碍物的安全膨胀范围,  $i \in O$ ;  $d_{op}^j$ 为第 $j$ 个其他行人的私人空间范围,  $j \in P$ ;  $O$ 和 $P$ 分别为障碍物和其他行人的集合, 当跟随机器人进入障碍物安全膨胀范围或者其他行人的私人区域, 则该障碍物和其他行人将会分别被添加至集合 $O$ 和 $P$ 中。

### 2.2 基于阻抗控制的柔顺跟随控制器

根据式(9), 可由跟随机器人的实际位置 $X_r = [x_r, y_r]^T$ 得到:

$$\begin{cases} \dot{X}_r = [\dot{x}_r, \dot{y}_r]^T = J u_r \\ \ddot{X}_r = [\ddot{x}_r, \ddot{y}_r]^T = q + J(g + H u_d) \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_r &= [v \quad w]^T \\ \mathbf{u}_d &= [v_d \quad w_d]^T \\ \mathbf{g} &= \begin{bmatrix} -\frac{\psi_2}{\psi_1} v & -\frac{\psi_4}{\psi_3} w \end{bmatrix}^T \\ \mathbf{H} &= \begin{bmatrix} 1/\psi_1 & 0 \\ 0 & 1/\psi_3 \end{bmatrix} \\ \mathbf{J} &= \begin{bmatrix} \cos \theta_r & -d \sin \theta_r \\ \sin \theta_r & d \cos \theta_r \end{bmatrix} \\ \mathbf{q} &= \begin{bmatrix} -v \sin \theta_r & -dw \cos \theta_r \\ v \cos \theta_r & -dw \sin \theta_r \end{bmatrix} \end{aligned}$$

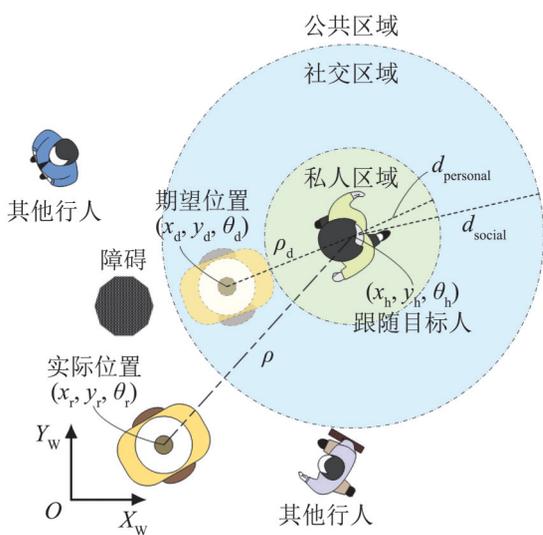


图2 人机共融环境中的人机跟随模型  
Fig. 2 Model schematic of human-following robot in social environment

基于式(11)对系统采用反馈线性化<sup>[21]</sup>可得

$$\mathbf{u}_d = \mathbf{H}^{-1} [\mathbf{J}^{-1} (\mathbf{u} - \mathbf{q}) - \mathbf{g}] \quad (12)$$

定义  $\mathbf{F}_d$  为期望阻抗力, 则人机跟随的期望阻抗控制模型为

$$\mathbf{F}_d = \mathbf{I}\ddot{\mathbf{E}} + \mathbf{B}\dot{\mathbf{E}} + \mathbf{K}\mathbf{E} \quad (13)$$

$$\mathbf{E} = \mathbf{X}_d - \mathbf{X}_r$$

式中:  $\mathbf{X}_d$  为跟随机器人的期望位置;  $\mathbf{I} = \text{diag}(i, i)$  为惯性矩阵;  $\mathbf{B} = \text{diag}(b, b)$  为阻尼矩阵;  $\mathbf{K} = \text{diag}(k, k)$  为弹性矩阵, 系数  $i, b, k > 0$ 。

$$\ddot{\mathbf{X}}_r = \mathbf{I}^{-1} (\mathbf{B}\dot{\mathbf{E}} + \mathbf{K}\mathbf{E} - \mathbf{F}_d) + \ddot{\mathbf{X}}_d \quad (14)$$

$\ddot{\mathbf{X}}_d$  可由跟随机器人的期望跟随位置和被跟随目标人的位置关系计算得到:

$$\ddot{\mathbf{X}}_d = \begin{bmatrix} \ddot{x}_h - \rho_d \ddot{\theta}_h^2 \cos(\theta_d + \theta_h) - \rho_d \ddot{\theta}_h \sin(\theta_d + \theta_h) \\ \ddot{y}_h - \rho_d \ddot{\theta}_h^2 \sin(\theta_d + \theta_h) + \rho_d \ddot{\theta}_h \cos(\theta_d + \theta_h) \end{bmatrix} \quad (15)$$

将式(14)代入式(12)即可得到基于阻抗控制的柔顺跟随控制器:

$$\mathbf{u}_d = \mathbf{H}^{-1} [\mathbf{J}^{-1} (\mathbf{I}^{-1} (\mathbf{B}\dot{\mathbf{E}} + \mathbf{K}\mathbf{E} - \mathbf{F}_d) + \ddot{\mathbf{X}}_d - \mathbf{q}) - \mathbf{g}] \quad (16)$$

根据文献[23]的研究可知, 系统的稳定除了要求系数  $i, b, k > 0$  外, 还需要满足如下条件:

$$\begin{cases} b^2 < 4ik \text{ 时, } 0 < T < b/k \\ b^2 \geq 4ik \text{ 时, } 0 < T < (b - \sqrt{b^2 - 4ik})/k \end{cases} \quad (17)$$

在满足式(17)的系统稳定性条件下, 选取合适的阻抗控制器参数  $i, b, k$  即可使系统满足期望的动态性能<sup>[23]</sup>。

### 2.3 基于拓展社会力模型的避障策略

社会力模型<sup>[24]</sup>是一种用于描述社会环境中行人运动行为与特征的模型, 该模型将行人与周围障碍物及自身目标点之间的关系用非物理力的形式进行描述, 假定行人之间的潜在斥力是关于两者距离及行人占有半径的单调递减函数。Gonzalo等<sup>[25]</sup>在社会力模型的基础上, 考虑了陪伴机器人与人之间的交互作用, 提出拓展社会力模型用于构建陪伴机器人的社会性导航框架。本文将在阻抗控制器的基础上构建拓展社会力模型, 设计与人友好的柔顺跟随避障控制策略, 如图3所示。

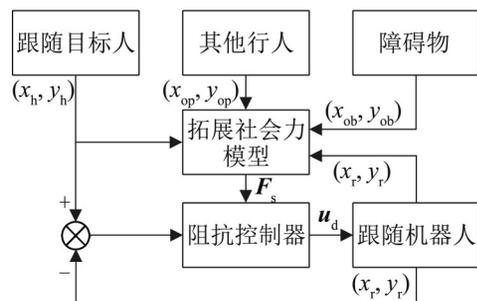


图3 人机友好的柔顺跟随与避障控制策略  
Fig. 3 Human-friendly compliant human-following and obstacle avoidance control strategy

根据文献[21,25], 将虚拟拓展社会力  $F_s$  定义为

$$F_s = \gamma \frac{e^{-\lambda/\lambda_r} - e^{-\lambda^n}}{1 - e^{-\lambda^n}} \quad (18)$$

式中:  $\gamma$  为力的强度系数;  $\lambda$  为个体间的距离;  $\lambda_r$  为个体占有的半径;  $n \in \mathbb{N}$  表示阶数。为便于下文描述将式(18)记为  $F_s(\gamma, \lambda, \lambda_r, n)$ 。

跟随机器人在社会环境中的运动主要受被跟随目标人、其他行人及障碍物这三者的影响, 如图4所示。图4中紫色箭头表示人的运动轨迹, 在不受障碍物和其他行人影响的情况下, 机器人跟随轨迹与目标人的运动轨迹一致。但在跟随过程机器人会受到障碍物和其他行人的社会力场的影响, 并在社会力的作用下调整运动轨迹, 实现在完成跟随任务的同时避开障碍物以及其他行人的私人区域, 如图4中绿色箭头所表示的运动轨迹。

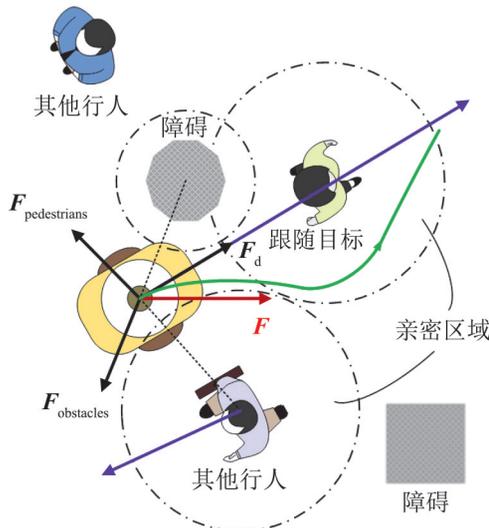


图4 拓展社会力模型

Fig. 4 Schematic of extended social-force model

跟随过程的人机交互力即为阻抗控制器产生的阻抗力  $F_d$ 。当跟随距离大于设定值时, 阻抗力产生吸引效应, 将机器人推向目标人方向。当跟随距离小于设定值时, 阻抗力将转换为排斥作用, 将机器人推离目标人以保持恰当的间距, 本文将跟随距离设定值设置在目标人的社交区域内, 确

保在实现对目标进行跟随的同时又不侵犯目标人的私人区域。

为了提升跟随机器人的社会接纳度, 需要提升其他行人的社交舒适度, 则需避免跟随机器人进入其他行人的私人区域, 因此, 在其他行人的私人区域设置一个拓展社会力场:

$$F_{pedestrians}^j = F_s(\gamma_p^j, \rho_p^j, d_{op}^j, n_p^j), j \in P \quad (19)$$

为了避开环境中的障碍物以保障机器人的安全, 同时避免因障碍遮挡而丢失跟随目标, 在障碍物的膨胀范围内设置一个拓展社会力场:

$$F_{obstacles}^i = F_s(\gamma_o^i, \rho_o^i, d_{ob}^i, n_o^i), i \in O \quad (20)$$

跟随机器人在跟随运动过程中受到的总拓展社会力作用为

$$F = F_d - \sum_{i \in O} F_{obstacles}^i - \sum_{j \in P} F_{pedestrians}^j \quad (21)$$

将式(21)代入到阻抗控制器(16)中即可得到基于拓展社会力的跟随避障控制律:

$$u_d = H^{-1} [J^{-1} (I^{-1} (B\dot{E} + KE - F) + \ddot{X}_d - q) - g] \quad (22)$$

### 3 仿真实验

本文通过 MATLAB Simulink 搭建本文提出的基于拓展社会力模型的移动机器人柔顺跟随控制器, 对跟随机器人进行控制, 实现对被跟随目标人的柔顺跟随陪伴, 对人机共融环境中的障碍物实现躲避, 同时避免侵犯其他行人的私密空间, 以提升跟随机器人的舒适性和安全性。跟随机器人系统相关参数如表1所示, 系统仿真参数如表2所示。

表1 跟随机器人参数

Table 1 Human-following robot parameter settings

主要参数	量值
机器人质量 $m/\text{kg}$	40
驱动轮半径 $r/\text{m}$	0.216
驱动轮轴距 $L/\text{m}$	0.525
形心到轮轴中心的距离 $d/\text{m}$	0.04
动力学模型参数 $\psi_1$	0.003
动力学模型参数 $\psi_2$	0.1
动力学模型参数 $\psi_3$	0.1
动力学模型参数 $\psi_4$	0.1

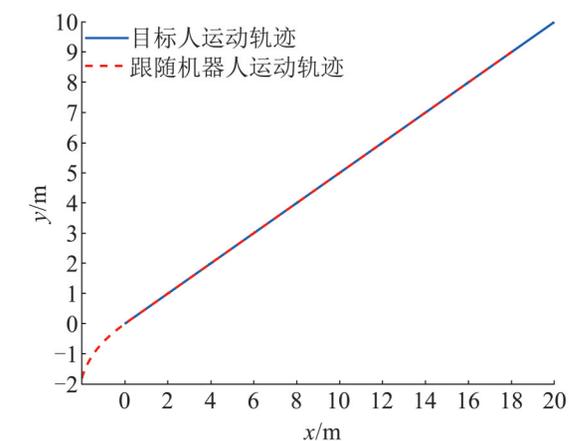
表2 系统仿真参数  
Table 2 Simulation parameter settings

主要参数	量值
目标人私人区域半径 $d_{\text{personal}}/\text{m}$	1.5
目标人社交区域半径 $d_{\text{social}}/\text{m}$	3.66
其他行人的私人区域半径 $d_{\text{op}}^i/\text{m}$	1.5
障碍物的膨胀范围 $d_{\text{ob}}^i/\text{m}$	1
跟随距离 $\rho_d/\text{m}$	2
惯性系数 $i$	10
阻尼系数 $b$	500
弹性系数 $k$	7 200
拓展社会力强度系数 $\gamma$	10 000
拓展社会力方程阶数 $n$	2

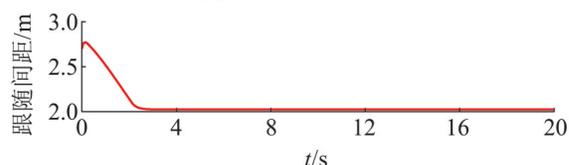
### 3.1 无障碍跟随实验

#### 3.1.1 直线轨迹

在人的日常行走过程中，运动轨迹主要包含直线运动和转向运动。为了验证本文方法可实现对目标人的动态跟随，先采用最简单的直线轨迹作为目标人的运动轨迹进行分析，如图5所示。



(a) 人机跟随运动轨迹



(b) 人机跟随间距变化曲线

图5 无障碍的直线轨迹跟随实验

Fig. 5 Straight trajectory experiment without obstacles for human-following robot

图5(a)为被跟随目标人按照直线轨迹运动20 s

的人机跟随运动轨迹，其中，目标人的运动轨迹起始点为(0, 0)，终止点为(20, 10)，跟随机器人的跟随运动轨迹起始位置为(-2, -2)，终止位置在(18.2, 9.1)附近。图5(b)是跟随过程中机器人和人之间的间距变化曲线，初始时机器人位置距离目标人较远，机器人快速调整位姿朝向目标人运动，二者间距逐渐缩小，经过2 s左右收敛至设定的跟随距离并保持间距不变。图5所示的人机跟随轨迹仿真结果验证了该方法可实现对目标人的跟随。

#### 3.1.2 圆形轨迹

圆形轨迹是一种转向运动。为了更进一步地验证本文方法的有效性和优越性，将更为复杂的圆形轨迹设置为目标人的运动轨迹进行深入分析。各项系统仿真参数与直线轨迹实验保持一致，均采用表1~2数据。

图6(a)中全局坐标系下目标人的运动轨迹起始位置和终止位置均为(3, 3)，跟随机器人的跟随运动轨迹起始位置为(3, 0.5)，终止位置为(2.92, 0.86)，跟随距离保持在2 m，目标人的私人区域半径为1.5 m，因此，机器人始终保持在目标人的私人区域外围。图6(b)和(c)中蓝色虚线是将目标人的运动轨迹经过坐标转换和去除跟随距离的处理后得到的x和y轴方向的运动轨迹，红色的是跟随机器人在x和y轴方向的跟随运动轨迹。通过图6所示的人机跟随轨迹仿真结果进一步验证了该方法可实现对目标人的跟随。图6(d)中机器人x和y轴方向上的阻抗力分量变化曲线在初始位置阶段增长变化较大，这是因为跟随机器人与目标人的初始间距为2.5 m，相距较远，阻抗控制器产生一个较大的阻抗力促使机器人快速起步跟上目标。如图6(e)和(f)中机器人角速度和线速度在初始阶段增长较快，增长幅度较大，以快速跟上目标。当跟随距离稳定后阻抗力平缓下降，且整个跟随过程都是平缓变化的，机器人的线速度和角速度也均可稳定地跟随目标人的变化。整个过程体现出了阻抗控制器的柔顺特性。

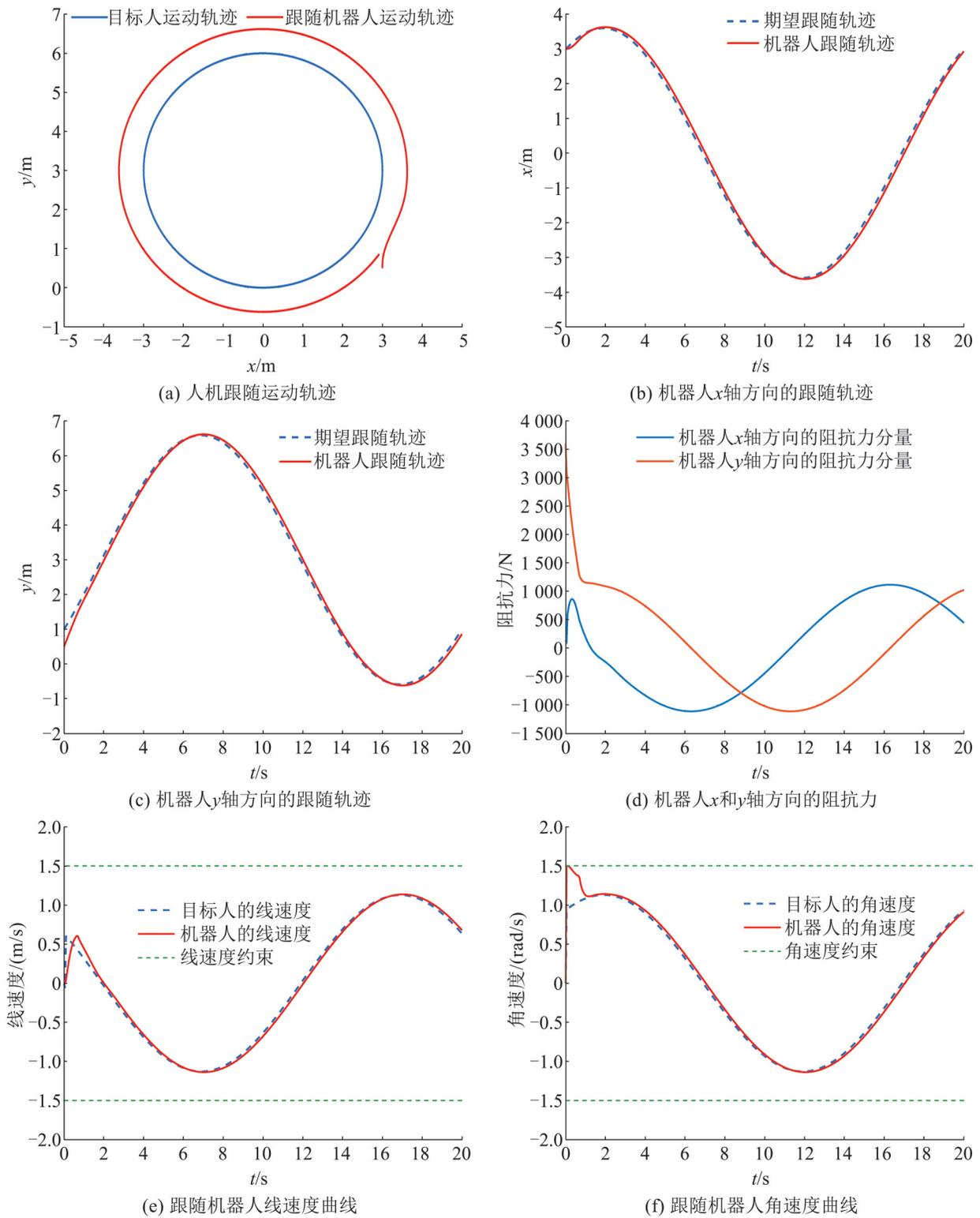


图6 无障碍的圆形轨迹跟随实验

Fig. 6 Circular trajectory experiment without obstacles for human-following robot

为了避免出现产生的速度指令过大, 在仿真时给速度变量添加了边界约束, 如图6(e)和(f)中

的绿色虚线所示, 当其数值超过阈值时直接将阈值作为该变量数值。图6(f)中初始阶段跟随机器人

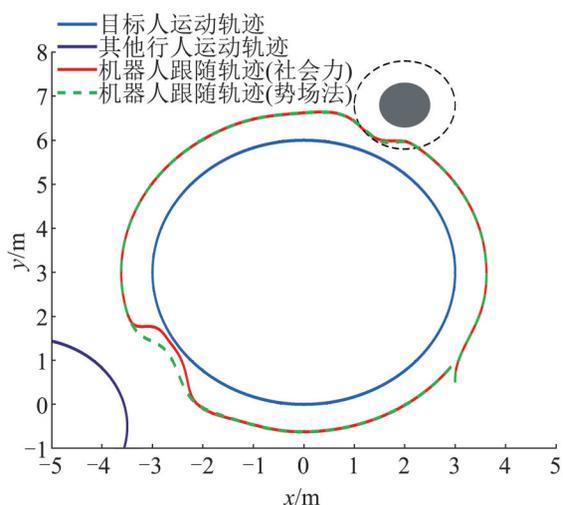
角速度出现增长过大的情况，但受边界约束的作用，其最大值未超出阈值，保障了系统的安全。

### 3.2 有障碍的圆形轨迹跟随实验

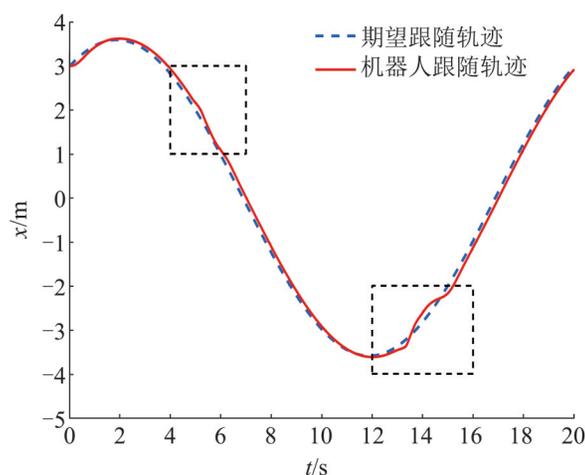
图 7(a)中灰色实心圆是一个静态障碍物，中心坐标为(2, 6.8)，障碍物半径为0.5 m，虚线圆圈表示安全膨胀范围为1 m；左下角曲线是动态障碍物(其他行人)的运动轨迹，运动方向与跟随目标相反，其私人空间区域半径设为1.5 m；蓝色曲线是被跟随目标人的运动轨迹，起始位置和终止位置均为(3, 3)；红色曲线是跟随机器人的跟随运动轨迹，起始位置为(3, 0.5)，终止位置为(2.92, 0.86)。图 7 表明跟随机器人在完成跟随任务的过程中能够避开静态和动态障碍物。

图 7(d)中系统运行后机器人跟随目标人运动，

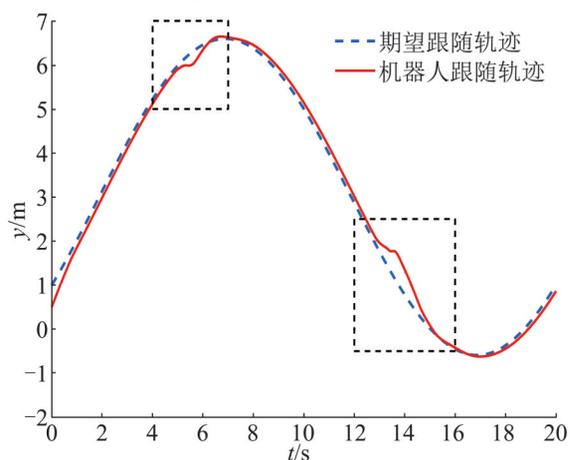
逐步靠近静态障碍物，二者的距离逐渐减小，当距离小于障碍物的膨胀范围半径时机器人与静态障碍物之间产生一个排斥型社会力  $F_{obstacles}$ 。在力的作用下机器人调整姿态避开障碍，如图 7(b)和 (c)中的左侧虚线框标注所示，机器人的运动轨迹发生偏移。图 7(d)中二者距离小于障碍的膨胀范围半径后开始逐渐增大，机器人与障碍物之间的社会力逐渐变小。由表 3 数据可知机器人与障碍物之间的最小距离为 0.818 m，机器人依旧与障碍物保持一定距离，而且机器人在障碍膨胀范围内(安全区)移动时间很短，能够在较短时间内调整运动轨迹避开障碍。表明跟随机器人在社会力场的作用下可在保持对目标跟随的同时避开障碍物，以保障自身安全。



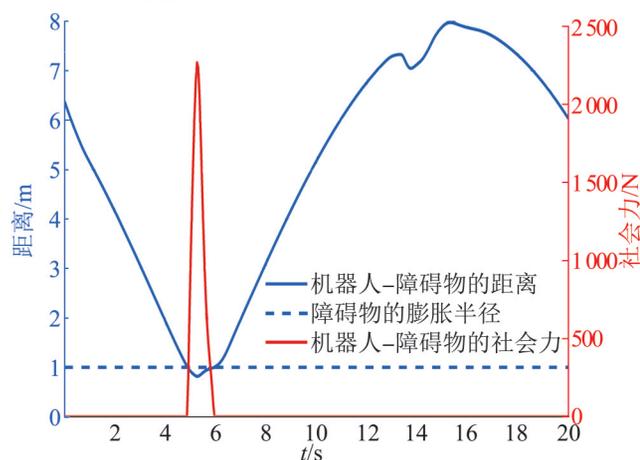
(a) 人机跟随运动轨迹



(b) 机器人x轴方向的跟随轨迹



(c) 机器人y轴方向的跟随轨迹



(d) 机器人-静态障碍的距离和社会力曲线

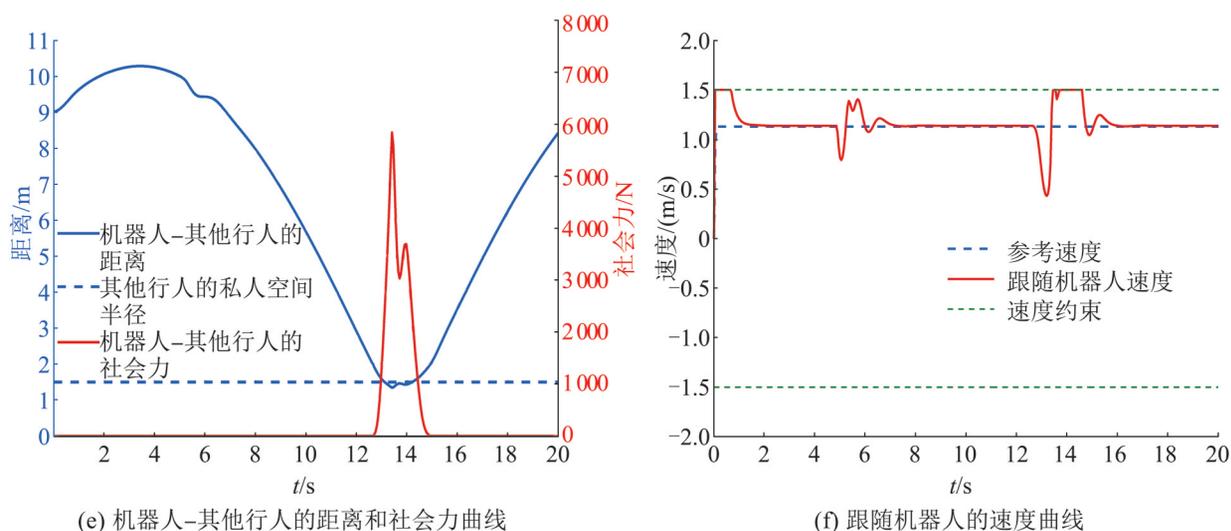


图7 有障碍的圆形轨迹跟随实验  
Fig. 7 Circular trajectory experiment with obstacles

表3 有障碍圆形轨迹跟随实验结果  
Table 3 Experimental parameters of circular trajectory with obstacles

类别	安全区时间/s	最小间距/m
机器人-静态障碍物	1.05	0.818
机器人-动态障碍物	1.15	1.345
机器人-被跟随目标	0	2.015
人工势场(静态障碍物)	1.25	0.811
人工势场(动态障碍物)	2.70	1.152

图7(e)中初始阶段跟随机器人与其他行人(动态障碍物)互为反向运动,二者间距逐渐变大,随着机器人跟随目标人朝行人方向运动,二者间距逐渐缩小。在系统运行13 s左右后,跟随机器人与行人相遇,并且进入行人的私人区域,机器人和行人之间也产生一个排斥型社会力  $F_{pedestrians}$ , 在力的作用下跟随机器人开始调整位姿以避免进入行人的私人区域,如图7(b)和(c)中的右侧虚线框标注所示,机器人的运动轨迹发生偏移,且根据表3可知机器人能够在较短的时间内调整运动轨迹。图7(e)中跟随机器人靠近私人区域后,与行人的距离便逐渐增大,即机器人在远离行人的私人区域。表明跟随机器人在社会力场的作用下能够主动避开人的私人区域。

图7(f)中跟随机器人初始速度较大,机器人能

较快地跟随上目标,系统稳定后速度缓慢下降收敛至目标人的运动速度。遇到障碍物和其他行人时,机器人的速度也是小范围快速调整,能够在较短时间内规避障碍,并调整跟随位置。

为了对比分析拓展社会力模型在人机跟随控制中的避障性能,本文采用了经典的人工势场法进行对比实验,即在静态障碍物和其他行人位置上设置 Khatib 势场<sup>[26]</sup>。对 Khatib 势场函数求负梯度,可得障碍物产生的虚拟斥力:

$$F = \begin{cases} \frac{\eta}{\rho_{ob}^2} \left( \frac{1}{\rho_{ob}} - \frac{1}{\rho_o} \right) \frac{\partial \rho_{ob}}{\partial X}, \rho_{ob} \leq \rho_o \\ 0, \rho_{ob} > \rho_o \end{cases}$$

式中:  $\rho_{ob}$  为跟随机器人与障碍物之间的距离;  $\rho_o$  为障碍物膨胀范围;  $\eta$  为增益系数;  $X$  为机器人的实际位置  $(x, y)$ 。

图7(a)中绿色虚线为使用人工势场法进行避障的机器人跟随运动轨迹。根据表3数据可知,采用拓展社会力和人工势场2种方式对静态障碍物规避时性能差别不大,但是在规避其他行人(动态障碍物)时,人工势场法会使得跟随机器人在其他行人的私人区域(安全区)运行时间过长,且与人之间的最小距离更小,这会使其他行人的舒适性下降,从而导致跟随机器人的社会接纳度降低。

## 4 结论

本文针对人机共融环境下移动机器人的跟随避障控制问题,提出一种基于拓展社会力模型的柔顺跟随与避障控制策略。利用期望阻抗模型描述机器人与环境的交互力和机器人位移的动态关系,设计并实现基于阻抗控制的柔顺跟随控制器。考虑人机共融环境下“人-机器人-障碍物”三者之间的交互作用关系,在阻抗控制器基础上引入拓展社会力模型和空间关系学理论设计了一种人机友好的柔顺跟随避障控制策略。设计了仿真实验:根据跟随轨迹曲线、速度曲线和进入安全区的时间以及最小间距等实验结果,验证了本文算法适用于行人社交的日常生活场景;通过与人工势场法对比实验,验证了本文算法可有效地解决了机器人跟随运动过程的避障问题,同时保障了目标人和其他行人的舒适性,提升了跟随机器人的社会接纳度。

后续工作将在以下几个方面展开深入研究:利用系统辨识或者神经网络的方法建立更加精确恰当的系统动力学模型,实现对系统更加精细的控制;采用自适应方法对阻抗控制器参数进行自适应整定,以增强系统的鲁棒性和自适应性;将会在更加复杂的社会场景中对算法进行实验验证,将算法应用在人机跟随系统实体。

### 参考文献:

- [1] 何玉庆, 赵忆文, 韩建达, 等. 与人共融-机器人技术发展的新趋势[J]. 机器人产业, 2015(5): 74-80.  
He Yuqing, Zhao Yiwen, Han Jianda, et al. Inclusion With People-a New Trend in Robotics Development[J]. Robot Industry, 2015(5): 74-80.
- [2] Kobayashi Y, Kinpara Y, Shibusawa T, et al. Robotic Wheelchair Based on Observations of People Using Integrated Sensors[C]//2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 2013-2018.
- [3] Yan Shihao, Tao Jing, Huang Jian, et al. Model Predictive Control for Human Following Rehabilitation Robot[C]//2019 IEEE International Conference on Advanced Robotics and Its Social Impacts (ARSO). NJ, USA: IEEE, 2019: 369-374.
- [4] Pineau J, Montemerlo M, Pollack M, et al. Towards Robotic Assistants in Nursing Homes: Challenges and Results[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2003, 42(3/4): 271-281.
- [5] 李晓天. 一种跟随式助老机器人的设计与研究[J]. 电子世界, 2021(16): 104-106.  
Li Xiaotian. Design and Research of a Following Elderly Assistance Robot[J]. Electronics World, 2021(16): 104-106.
- [6] Edmonds M, Yigit T, Hong V, et al. Optimal Trajectories for Autonomous Human-following Carts With Gesture-Based Contactless Positioning Suggestions[C]//2021 American Control Conference(ACC). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2021: 3896-3901.
- [7] 胡荣, 章小宝, 谭菊华. 基于深度学习的智能物流分拣跟随机器人的设计与研究[J]. 中国储运, 2022(2): 141-142.  
Hu Rong, Zhang Xiaobao, Tan Juhua. Design and Research of Intelligent Logistics Sorting Following Robot Based on Deep Learning[J]. China Storage & Transport, 2022(2): 141-142.
- [8] 谢嘉, 桑成松, 王世明, 等. 智能跟随移动机器人的研究与应用前景综述[J]. 制造业自动化, 2020, 42(10): 49-55.  
Xie Jia, Sang Chengsong, Wang Shiming, et al. Overview of Research and Application Prospect of Intelligent Following Mobile Robot[J]. Manufacturing Automation, 2020, 42(10): 49-55.
- [9] 孙月, 刘景泰. 基于RGB-D传感器的室内服务机器人舒适跟随方法[J]. 机器人, 2019, 41(6): 823-833.  
Sun Yue, Liu Jingtai. RGB-D Sensor Based Human Comfortable Following Behavior for Service Robots in Indoor Environments[J]. Robot, 2019, 41(6): 823-833.
- [10] Jia Songmin, Wang Lijia, Wang Shuang, et al. Fuzzy-based Intelligent Control Strategy for a Person Following Robot[C]//2013 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics(ROBIO). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2013: 2408-2413.
- [11] Nakazawa K, Takahashi K, Kaneko M. Movement Control of Accompanying Robot Based on Artificial Potential Field Adapted to Dynamic Environments[J]. Electrical Engineering in Japan, 2015, 192(1): 25-35.
- [12] Sekiguchi S, Yorozu A, Kuno K, et al. Human-friendly Control System Design for Two-wheeled Service Robot With Optimal Control Approach[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2020, 131: 103562.
- [13] Hall E T, Birdwhistell R L, Bock B, et al. Proxemics and Comments and Replies[J]. Current Anthropology, 1968, 9

- (2/3): 83-108.
- [14] 孙立香, 孙晓娟, 刘成菊, 等. 人群环境中基于深度强化学习的移动机器人避障算法[J]. 信息与控制, 2022, 51(1): 107-118.  
Sun Lixiang, Sun Xiaoxian, Liu Chengju, et al. Obstacle Avoidance Algorithm for Mobile Robot Based on Deep Reinforcement Learning in Crowd Environment[J]. Information and Control, 2022, 51(1): 107-118.
- [15] Hogan N. Impedance Control: An Approach to Manipulation[C]//1984 American Control Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1984: 304-313.
- [16] Hogan N. Impedance Control: An Approach to Manipulation[C]//1984 American Control Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1984: 304-313.
- [17] Hogan N. Impedance Control: An Approach to Manipulation: Part II-implementation[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1985, 107(1): 8-16.
- [18] 陈靓, 黄玉平, 陶云飞, 等. 基于阻抗模型的下肢康复机器人交互控制系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2020, 28(4): 116-120.  
Chen Liang, Huang Yuping, Tao Yunfei, et al. Design of Interactive Control System of Lower Limb Rehabilitation Robot Based on Impedance Model[J]. Computer Measurement & Control, 2020, 28(4): 116-120.
- [19] Morioka K, Lee J H, Hashimoto H. Human-following Mobile Robot in a Distributed Intelligent Sensor Network[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2004, 51(1): 229-237.
- [20] 姚瀚晨, 彭建伟, 戴厚德, 等. 基于改进弹簧模型的移动机器人柔顺跟随行人方法[J]. 机器人, 2021, 43(6): 684-693.  
Yao Hanchen, Peng Jianwei, Dai Houde, et al. A Compliant Human Following Method for Mobile Robot Based on an Improved Spring Model[J]. Robot, 2021, 43(6): 684-693.
- [21] Herrera D, Roberti F, Toibero M, et al. Human Interaction Dynamics for Its Use in Mobile Robotics: Impedance Control for Leader-follower Formation[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2017, 4(4): 696-703.
- [22] Celso De La Cruz, Carelli R. Dynamic Model Based Formation Control and Obstacle Avoidance of Multi-robot Systems[J]. Robotica, 2008, 26(3): 345-356.
- [23] 陈明, 甘亚辉, 戴先中, 等. 基于阻抗控制的工业机器人轨迹跟踪系统设计[C]//第十二届中国智能机器人大会论文集. 哈尔滨: 中国人工智能学会, 2017: 324-331.  
Chen Ming, Gan Yahui, Dai Xianzhong, et al. Design of Trajectory Tracking System for Industrial Robots Based on Impedance Control[C]//Proceedings of the 12th China Intelligent Robot Conference. Harbin: Chinese Association for Artificial Intelligence, 2017: 324-331.
- [24] Dirk Helbing, Péter Molnár. Social Force Model for Pedestrian Dynamics[J]. Physical Review E, 1995, 51(5): 4282-4286.
- [25] Gonzalo Ferrer, Anaís Garrell Zulueta, Fernando Herrero Cotarelo, et al. Robot Social-aware Navigation Framework to Accompany People Walking Side-by-side[J]. Autonomous Robots, 2017, 41(4): 775-793.
- [26] Khatib O. Real-time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots[C]//Proceedings. 1985 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1985: 500-505.