

DOI:

防老年人跌倒的助老机器人人机系统 动态稳定性分析模型

穆小奇^{1,2}, 张小栋^{1,2}, 徐海鹏^{1,2}, 李亮亮^{1,2}

(1.西安交通大学机械工程学院机器人与智能系统研究所, 710049, 西安;

2.西安交通大学陕西省智能机器人重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对现有助行机器人防老年人跌倒的安全保障措施不够完善、模型存在局限性的问题, 建立了防止老年人跌倒的助老机器人人机系统动力学模型, 对人机系统的动态稳定性展开分析研究。首先, 建立了人体倒立摆动力学模型, 得到了人体动态稳定性区域以及人体跌倒的可能形式; 其次, 分别从前倾、后倾、左倾和右倾 4 种情况建立了防老年人跌倒的人机系统动力学模型, 并给出了系统动态稳定必须满足的约束条件; 最后, 通过求解人机系统动力学方程对人体和助老机器人的动态稳定性分别进行了分析判断, 并搭建了实验平台, 分别对 4 种情况进行了实验, 验证了模型的有效性。实验结果表明: 4 种情况下, 助老机器人的倾角均小于 1° , 人体的倾角均在短时间内迅速下降至零度, 人机系统满足动态稳定性要求, 课题组设计的助老机器人在帮助使用者进行户外行走过程中, 能够起到防止老年人跌倒的目的。在人机系统动态稳定性分析中建立的动力学模型为同类机器人的控制研究提供了理论基础, 有助于助老机器人实用化。

关键词: 助老机器人; 动态稳定性; 人机系统; 动力学模型

中图分类号: TH113 文献标志码: A 文章编号: 0253-987X(2020)08-0000-00

Dynamic Stability Analysis Models of Human-Robot System of Elderly-Assistant Robot for the Elderly Fall Prevention

MU Xiaoqi^{1,2}, ZHANG Xiaodong^{1,2}, XU Haipeng^{1,2}, LI Liangliang^{1,2}

(1.Institute of Robotics & Intelligent Systems, School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Shaanxi Key Laboratory of Intelligent Robot, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In view of the problems of inadequate security measures and models' limitations of the elderly fall prevention for the existing walking-assistant robot, the dynamical models of the human-robot system to prevent the elderly from falling are established for the designed elderly-assistant robot, and the dynamic stability of human-robot system is analyzed. Firstly, the dynamical model of human inverted pendulum is established, and the dynamic stability region of human body and the possible form of human fall are obtained. Then, the dynamical models of the human-robot system to prevent the elderly from falling are established from four situations, namely, human fall forward, fall back, fall to the left, and fall to the right respectively, and the constraint conditions of dynamic stability of the system are given. Finally, the dynamic stabilities of the human body and the robot are respectively analyzed by solving the dynamic equations of the human-robot system, and experiments are conducted on the lab-scale robot to verify the effectiveness of the dynamical models. The experimental results show that the inclination angles of the robot are less than 1° ; and the inclination angles of the human body rapidly drop to zero in a short time in four situations. The human-robot system meets the requirements of dynamic stability, and the designed robot can prevent the elderly from fall. The dynamical models established in the dynamic stability analysis of human-robot system provide a theoretical basis for the control research of similar robots, which is helpful to the practical application of the elderly-assistant robot.

Keywords: elderly-assistant robot; dynamic stability; human-robot system; dynamical models

收稿日期: 2020-01-07。 作者简介: 穆小奇 (1988-), 男, 博士生; 张小栋 (通信作者), 男, 教授, 博士生导师。
基金项目: 2017 年新疆维吾尔自治区科技支疆项目计划资助项目 (2017E0284)。

网络出版时间:

网络出版地址:

随着很多国家迅速步入老龄化社会,越来越多的老年人患有运动机能障碍。由于神经系统控制能力下降,肌肉力量降低等引起下肢虚弱。日益增长的老年人数量导致从事护理工作的年轻人员短缺。因此,特别需要开发助老机器人来代替护士和家人照看老年人。目前,很多学者研究了各种老年人助行机器人^[1-12]。然而,在助行机器人帮助老年人行走的过程中,老年人在受到自身或外界干扰刺激时容易发生跌倒,导致伤残甚至死亡。因此,对助行机器人防老年人跌倒的研究显得尤为重要。

近年来,对助行机器人防老年人跌倒的研究主要有: NAKAGAWA S 等介绍了一种通过约束使用者上身行为来防止老年人跌倒的智能手杖机器人控制方法^[13],该方法根据支撑腿的位置调整机器人的导纳参数,当支撑腿位于转向方向的同一侧时,机器人不转向; DI Pei 等研究了一种智能手杖机器人,建立了人机系统的动态模型,采用阻抗控制方法实现其位置、姿态和力的控制以防止老年人跌倒^[14]; GERAVAND M 等以配备有可驱动手臂的助行机器人为研究对象,提出了一种防老年人跌倒的控制方法,该方法通过估算用户的质心和确定出需提供给老年人的支持力,进而防止老年人摔倒^[15]。目前,虽然对助行机器人防老年人跌倒的研究取得了一些成果,但仍然存在防老年人跌倒的安全保障措施不够完善、模型局限性等问题。

针对存在的问题,本实验室自主开发设计了助老机器人^[16]。该机器人采用基于触滑觉感知驱动的双电机差速控制方法,实现机器人的前进、后退和转弯,具有伴行和轮椅输送两个模态。如图 1 所示是它的伴行模态。

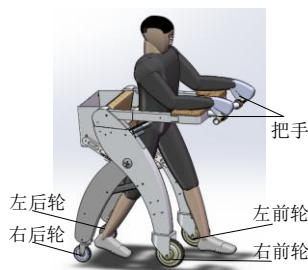


图 1 助老机器人伴行模态

图 1 中,机器人把手上安装有若干个触滑觉传感器;机器人四个轮分别定义为:左前轮、右前轮、左后轮和右后轮。左前轮和右前轮为驱动轮,左后轮和右后轮为万向轮。假设机器人伴行

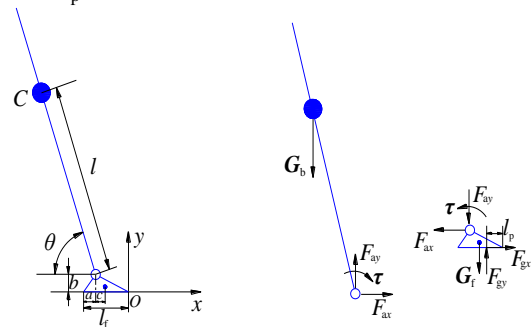
模态下,右前轮中心到右后轮中心的距离与右前轮中心到左前轮中心的距离相等。

本文在该助老机器人的基础上,建立了防止老年人跌倒的助老机器人人机系统动态稳定性分析模型,利用此模型对该助老机器人伴行模态下当老年人突然失去平衡时人机系统的动态稳定性进行了分析,并实验验证了所建模型的有效性。

1 人体跌倒模型建立

1.1 人体模型及动力学方程建立

将人体视为倒立摆刚体模型,包括两个环节:提供支撑的足部和身体其他部分(倒立摆部分)^[17,18]。如图 2(a)所示,足尖 O 为坐标原点; C 为人体质心; a 、 b 、 c 和 l_f 分别表示足跟到脚踝的水平距离、脚踝的垂直高度、足部质心到脚踝的水平距离和足长; l 和 θ 表示人体倒立摆部分的长度和其绕踝关节转动的角度。假设足部位置是两侧对称且静止的,对人体两环节分别进行受力分析。如图 2(b)所示, G_b 为人体倒立摆部分的重力 ($G_b = m_b g$, m_b 为倒立摆部分的质量); τ 表示脚踝转矩; F_{ax} 和 F_{ay} 分别表示踝关节受到的水平和垂直分力; F_{gx} 和 F_{gy} 分别表示足部受到地面反作用力的水平和垂直分力; G_f 为人体足部的重力 ($G_f = m_f g$, m_f 为足部的质量); l_p 表示足尖与压力中心之间的距离。



(a) 人体两环节模型 (b) 人体两环节受力分析

图 2 人体两环节模型及受力分析图

对人体两环节分别建立动力学方程,如式(1)所示。

$$\left. \begin{aligned} |\tau| &= m_b l^2 \ddot{\theta} + |G_b| l \cos \theta \\ F_{ax} &= m_b l (\ddot{\theta} \sin \theta + \dot{\theta}^2 \cos \theta) \\ F_{ay} &= m_b l (\ddot{\theta} \cos \theta - \dot{\theta}^2 \sin \theta) + |G_b| \\ l_p &= l_f - \left[\frac{c|G_f| - \tau - bF_{gx}}{F_{gy}} + a \right] \\ F_{gx} &= F_{ax} \\ F_{gy} &= |G_f| + F_{ay} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

另外,根据实际情况可知 4 个约束条件,如式(2)所示。

$$\begin{cases} 0 < l_p < l_f \\ F_{gy} \geq 0 \\ |F_{gx}| < \mu F_{gy} \\ \tau_{mp} \leq |\tau| \leq \tau_{md} \end{cases} \quad (2)$$

式中, μ 为地面与足底之间的动摩擦系数; τ_{mp} 与 τ_{md} 分别表示人体脚踝跖屈和背屈最大肌力矩。

1.2 人体动态稳定性区域求解

在1.1的基础上, 对人体运动进行动力学模拟计算, 运用优化算法找出能够满足假设给定人体质心位置, 使人体质心在速度降到0时其投影能够达到支撑面内的两个边界速度^[19]: (1)最大可容忍速度, 使人体质心速度降为0时人体质心的投影不超过支撑面前面的边界; (2)最小必须速度, 使人体质心速度降为0时人体质心的投影达到支撑面后面的边界。对应每一个给定的质心位置都可以确定一组最大和最小边界速度, 就可以在人体质心的位置-速度坐标系内画出人体动态稳定性区域(两个边界所包围的区域)。如果人体质心的位置-速度坐标落在动态稳定区域内, 人体就是稳定的; 反之, 人体就会失去平衡。为了求解人体动态稳定性区域, 依据式(1)和式(2), 利用典型男性相关参数^[20]如表1, 求解结果如图3。

表 1 典型男性相关参数

参数	数值
身高 h/m	1.78
体重 w/kg	80
足部质量 m_f/kg	2.32
倒立摆部分的质量 m_b/kg	77.68
倒立摆部分的长度 l/m	1.02
足长 l_f/m	0.27
足跟到脚踝的水平距离 a/m	0.05
脚踝的垂直高度 b/m	0.07
足部质心到脚踝的水平距离 c/m	0.09

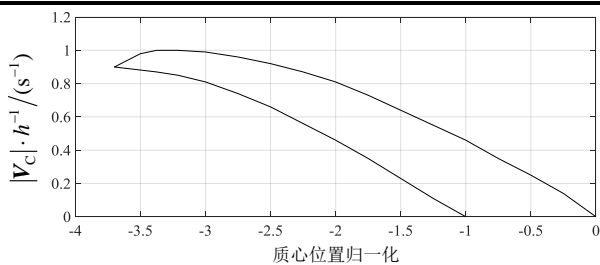


图 3 人体动态稳定性区域图

图3中, 人体足尖为质心位置的坐标原点, x 轴表示在矢状面内(前后方向)的人体质心位置, 并除以足长 l_f 进行归一化处理; y 轴表示前后方向上

相对于支撑面速度的人体质心速度 $|v_c|$, 并除以身高 h 进行处理。

1.3 人体跌倒机理及跌倒形式

人体质心位置-速度不在动态稳定区域, 人体就会失去平衡, 此时, 如果人体下肢不能及时提供足够的支撑或者提供足够时间完成保护步, 身体就会发生跌倒。对于老年人, 下肢肌肉衰退导致下肢无法支撑跌倒的身体; 同时由于老年人神经系统控制能力下降, 神经传导缓慢, 动作反应时间较长, 导致无法调整身体以保持平衡。老年人跌倒的可能形式, 如图4所示。

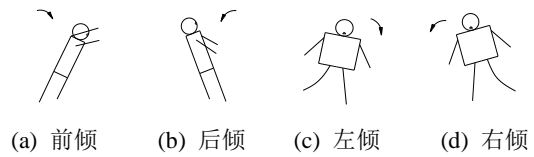


图 4 老年人跌倒的可能形式

2 伴行模态防老年人跌倒的人机

系统动力学模型建立

考虑到实际情况, 为确保老年人更加安全, 增加安全气囊对人体进行保护, 若老年人有跌倒的可能迅速打开安全气囊。根据老年人可能发生的跌倒形式, 分别从老年人前倾、后倾、左倾和右倾 4 种情况对人机系统动态稳定性进行分析, 以达到防止老年人跌倒的目的。

2.1 前倾情况

若助老机器人人机系统以 $|V| = 0.8m/s$ 的速度向前行走时, 突然老年人向前倾倒, 此时助老机器人需向前缓慢地停止移动完成对人体的保护步, 同时安全气囊打开。人体前倾情况下助老机器人人机系统的示意图如图 5 所示, 其中 β_f 表示人体前倾角度。

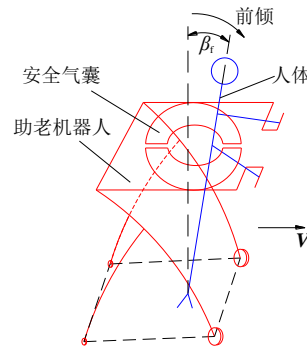


图 5 前倾情况人机系统示意图

在此基础上, 分别对人体和助老机器人进行

受力分析, 如图6所示。

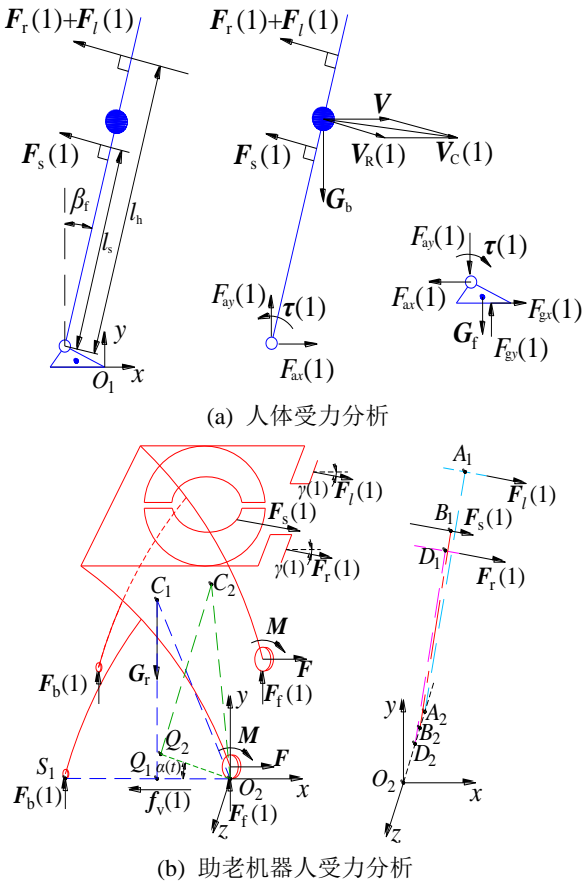


图 6 前倾情况人体与助老机器人受力分析图

图6(a)中, $F_l(1)$ 和 $F_r(1)$ 分别表示助老机器人的左、右把手施加给人体的反作用力, $F_s(1)$ 表示安全气囊施加给人体的反作用力, 假设合力 $[F_l(1)+F_r(1)]$ 与 $F_s(1)$ 两者方向均垂直于人体倒立摆部分; l_h 表示脚踝到合力 $[F_l(1)+F_r(1)]$ 与人体倒立摆部分的垂足之间的距离; l_s 表示脚踝到 $F_s(1)$ 与人体倒立摆部分的垂足之间的距离; $V_R(1)$ 为人体质心的摆动速度; $V_C(1)$ 为人体质心的合速度; $F_{ax}(1)$ 和 $F_{ay}(1)$ 分别表示踝关节受到的水平和垂直分力; $\tau(1)$ 为脚踝转矩; $F_{gx}(1)$ 和 $F_{gy}(1)$ 分别表示足部受到地面反作用力的水平和垂直分量。对人体两环节分别建立动力学方程, 如式(3)所示。

$$\left. \begin{aligned} &|F_l(1)+F_r(1)|+|F_s(1)|+F_{ay}(1)\sin\beta_f-m_b l \ddot{\beta}_f \\ &=|G_b|\sin\beta_f+F_{ax}(1)\cos\beta_f \\ &F_{ay}(1)\cos\beta_f+F_{ax}(1)\sin\beta_f+m_b l \dot{\beta}_f^2=|G_b|\cos\beta_f \\ &|F_l(1)+F_r(1)|l_h+|F_s(1)|l_s+|\tau(1)|=|G_b|l\sin\beta_f+m_b l^2 \ddot{\beta}_f \\ &F_{gx}(1)=F_{ax}(1) \\ &F_{gy}(1)=F_{ay}(1)+|G_f| \\ &c|G_f|+|\tau(1)|=F_{gy}(1)(l_f-l_p-a)+bF_{gx}(1) \\ &V_C(1)=V+V_R(1) \end{aligned} \right\} (3)$$

图6(b)中, 机器人右前轮与地面的接触点为坐标原点 O_2 ; 水平向右为 x 轴正方向, 垂直地面向上为 y 轴正方向, 机器人两前轮与地面的接触点的连线为 z 轴, 其正方向符合右手法则。 C_1 和 C_2 分别为机器人重心的初位置点和前倾 $\alpha(t)$ 角后的位置点; S_1 为机器人右后轮与地面的接触点; 过 C_1 点作线段 S_1O_2 的垂线, 垂足为 Q_1 ; Q_2 为 Q_1 前倾 $\alpha(t)$ 角后的位置点; $F_l(1)$ 和 $F_r(1)$ 分别表示人体施加给机器人的左、右把手的作用力, $F_s(1)$ 为人体施加给安全气囊的作用力, $F_l(1)$ 和 $F_r(1)$ 与 x 轴的夹角均为 $\gamma(1)$; F 和 M 分别为机器人前轮的驱动力和驱动力矩; 线段 A_1A_2 、 D_1D_2 和 B_1B_2 分别为 $F_l(1)$ 、 $F_r(1)$ 和 $F_s(1)$ 与 z 轴的公垂线; $F_l(1)$ 和 $F_b(1)$ 分别表示机器人前、后轮受到的支持力; $f_v(1)$ 为机器人受到的总摩擦力; G_r 为机器人的重力。

根据动态平衡原理, 分别列出 $\alpha(t)$ 方向和 x 方向的动力学方程, 如式(4)所示。

$$\left. \begin{aligned} &4|M|+|F_r(1)|l_{D_1D_2}+|F_l(1)|l_{A_1A_2}+|F_s(1)|l_{B_1B_2} \\ &-|G_r|l_{C_1O_2}\cos(\alpha(t)+\angle C_1O_2Q_1)+2|F_b(1)|l_{S_1O_2}=J\ddot{\alpha}(t) \\ &|M|=r|F| \\ &G_r=m_r g \\ &|F_b(1)|=k_b l_{S_1O_2}\alpha(t)+c_b l_{S_1O_2}\dot{\alpha}(t) \\ &|F|+|F_r(1)+F_l(1)+F_s(1)|\cos\gamma(1)-|f_v(1)|=m_r \ddot{x}(t) \\ &|f_v(1)|=c_v \dot{x}(t) \end{aligned} \right\} (4)$$

式中, $l_{A_1A_2}$, $l_{B_1B_2}$, $l_{D_1D_2}$, $l_{C_1O_2}$ 和 $l_{S_1O_2}$ 分别为线段 A_1A_2 、 B_1B_2 、 D_1D_2 、 C_1O_2 和 S_1O_2 的长度; k_b 和 c_b 分别为机器人后轮轮胎的刚度和阻尼; r 为机器人前轮的半径; m_r 为机器人的质量; c_v 为摩擦阻尼; J 为转动惯量。

为了避免助老机器人发生前倾, 需满足动态稳定性约束条件, 如式(5)。

$$\left. \begin{aligned} &k_b \alpha(t)l_{S_1O_2}+c_b \dot{\alpha}(t)l_{S_1O_2} \neq 0 \\ &\alpha(t) \rightarrow 0 \end{aligned} \right\} (5)$$

同时, 助老机器人需向前缓慢地停止移动完成对人体的保护步, 则机器人移动位移 $x(t)$ 稳定于较小的值, 机器人速度 $\dot{x}(t)$ 稳定于0。

2.2 后倾情况

作与前倾情况相同分析, 若突然老年人向后倾倒, 助老机器人人机系统示意图如图7所示, β_b 表示人体后倾角度。

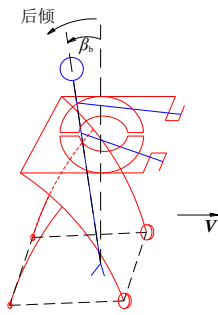
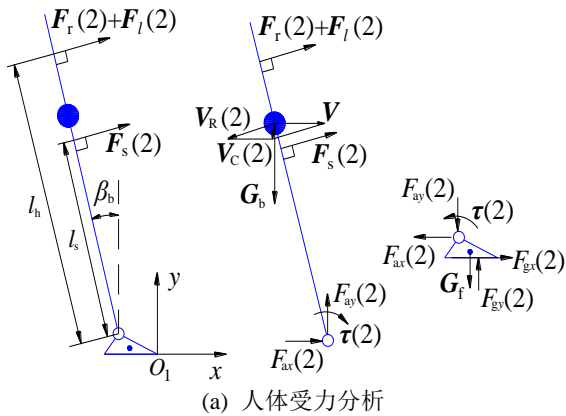
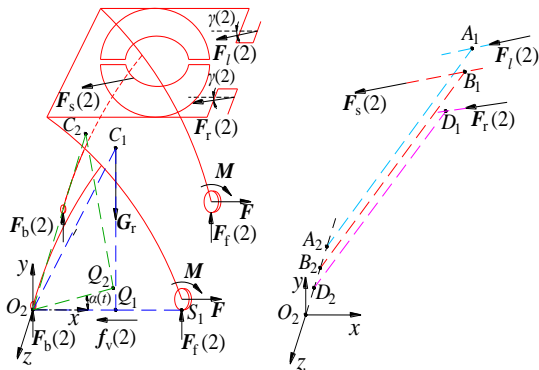


图 7 后倾情况人机系统示意图

同样地, 对人体和助老机器人分别进行受力分析, 如图 8 所示。



(a) 人体受力分析



(b) 助老机器人受力分析

图 8 后倾情况人体与助老机器人受力分析图

图 8(a)中, 各参量表示的物理意义与前倾情况相同。对人体两环节分别建立动力学方程, 如式(6)所示。

$$\left. \begin{aligned} &|F_r(2)+F_l(2)|+|F_s(2)|+F_{ay}(2)\sin\beta_b-m_b l \ddot{\beta}_b \\ &=|G_b|\sin\beta_b-F_{ax}(2)\cos\beta_b \\ &F_{ay}(2)\cos\beta_b-F_{ax}(2)\sin\beta_b+m_b l \dot{\beta}_b^2=|G_b|\cos\beta_b \\ &|F_r(2)+F_l(2)|l_h+|F_s(2)|l_s+|\tau(2)|=|G_b|l\sin\beta_b+m_b l^2 \ddot{\beta}_b \quad (6) \\ &F_{gx}(2)=F_{ax}(2) \\ &F_{gy}(2)=F_{ay}(2)+|G_r| \\ &c|G_r|-|\tau(2)|=F_{gy}(2)(l_f-l_p-a)+bF_{gx}(2) \\ &V_c(2)=V+V_R(2) \end{aligned} \right\}$$

图 8(b)中, 机器人右后轮与地面的接触点为坐标原点 O_2 ; x 轴和 y 轴正方向与前倾情况相同,

机器人两后轮与地面的接触点的连线为 z 轴, 其正方向符合右手法则。 S_1 为机器人右前轮与地面的接触点, 其它参量表示的物理意义与前倾情况相同。分别列出 $\alpha(t)$ 方向和 x 方向的动力学方程。如式(7)。

$$\left. \begin{aligned} &-4|M|+|F_r(2)|l_{D_1 D_2}+|F_l(2)|l_{A_1 A_2}+|F_s(2)|l_{B_1 B_2} \\ &-|G_r|l_{C_1 O_2} \cos(\alpha(t)+\angle C_1 O_2 Q_1)+2|F_f(2)|l_{S_1 O_2}=J \ddot{\alpha}(t) \\ &|M|=r|F| \\ &G_r=m_r g \\ &|F_r(2)|=k_f l_{S_1 O_2} \alpha(t)+c_f l_{S_1 O_2} \dot{\alpha}(t) \\ &|F|-|F_r(2)+F_l(2)+F_s(2)|\cos\gamma(2)-|f_v(2)|=m_r \ddot{x}(t) \\ &|f_v(2)|=c_v \dot{x}(t) \end{aligned} \right\} (7)$$

式中, k_f 和 c_f 分别为机器人前轮轮胎的刚度和阻尼, 其它参量表示的物理意义与式(4)相同。

同样地, 为了避免助老机器人发生后倾, 需满足动态稳定性约束条件, 如式(8)。同时, 助老机器人需向后缓慢地停止移动完成对人体的保护步, 则机器人移动位移 $x(t)$ 稳定于较小的值, 机器人速度 $\dot{x}(t)$ 稳定于 0。

$$\left. \begin{aligned} &k_f \alpha(t) l_{S_1 O_2}+c_f \dot{\alpha}(t) l_{S_1 O_2} \neq 0 \\ &|\alpha(t)| \rightarrow 0 \end{aligned} \right\} (8)$$

2.3 左倾情况

同样地, 若突然老年人向左倾倒地, 人机系统示意图如图 9 所示, β_l 表示人体左倾角度。

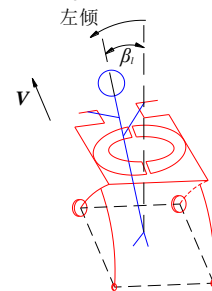
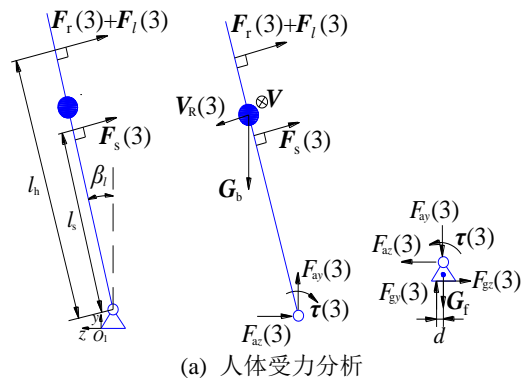
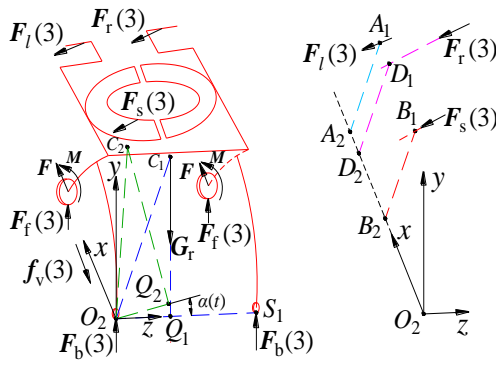


图 9 左倾情况人机系统示意图

对人体和助老机器人分别进行受力分析, 如图 10 所示。



(a) 人体受力分析



(b) 助老机器人受力分析

图 10 左倾情况人体与助老机器人受力分析图

图 10(a)中, 各参量表示的物理意义与前倾情况相同。对人体两环节分别建立动力学方程, 如式(9)所示。

$$\left. \begin{aligned} &|F_r(3) + F_l(3)| + |F_s(3)| + F_{ay}(3)\sin\beta_l - m_b l \ddot{\beta}_l \\ &= |G_b| \sin\beta_l - F_{az}(3)\cos\beta_l \\ &F_{ay}(3)\cos\beta_l - F_{az}(3)\sin\beta_l + m_b l \dot{\beta}_l^2 = |G_b| \cos\beta_l \\ &|F_r(3) + F_l(3)|l_h + |F_s(3)|l_s + |\tau(3)| = |G_b|l \sin\beta_l + m_b l^2 \ddot{\beta}_l \quad (9) \\ &F_{gz}(3) = F_{az}(3) \\ &F_{gy}(3) = F_{ay}(3) + |G_f| \\ &|\tau(3)| = F_{gy}(3)d - bF_{gz}(3) \end{aligned} \right\}$$

图 10(b)中, 机器人左后轮与地面的接触点为坐标原点 O_2 ; 水平向右为 z 轴正方向, 垂直地面向上为 y 轴正方向, 机器人左前、左后轮与地面的接触点的连线为 x 轴, 其正方向符合右手法则。 S_1 为机器人右后轮与地面的接触点, 其它参量表示的物理意义与前倾情况相同。分别列出 $\alpha(t)$ 方向和 x 方向的动力学方程。如式(10)。

$$\left. \begin{aligned} &|F_r(3)l_{D_1D_2} + |F_l(3)l_{A_1A_2} + |F_s(3)l_{B_1B_2} - |G_r|l_{C_1O_2} \\ &\cos(\alpha(t) + \angle C_1O_2Q_1) + |F_b(3)l_{S_1O_2} + |F_f(3)l_{S_1O_2} = J\ddot{\alpha}(t) \\ &G_r = m_r g \\ &|F_b(3)| = k_b l_{S_1O_2} \alpha(t) + c_b l_{S_1O_2} \dot{\alpha}(t) \\ &|F_f(3)| = k_f l_{S_1O_2} \alpha(t) + c_f l_{S_1O_2} \dot{\alpha}(t) \\ &|F| - |f_v(3)| = m_r \ddot{x}(t) \\ &|f_v(3)| = c_v \dot{x}(t) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

同样地, 为了避免助老机器人发生左倾, 需同时满足动态稳定性约束条件: 式(5)和式(8); 助老机器人还需向后缓慢地停止移动完成对人体的保护步, 则机器人移动位移 $x(t)$ 稳定于较小的值, 机器人速度 $\dot{x}(t)$ 稳定于 0。

2.4 右倾情况

同样地, 若突然老年人向右倾倒, 人机系统示意图如图 11 所示, β_r 表示人体右倾角度。

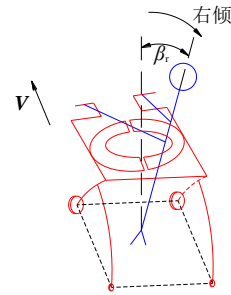
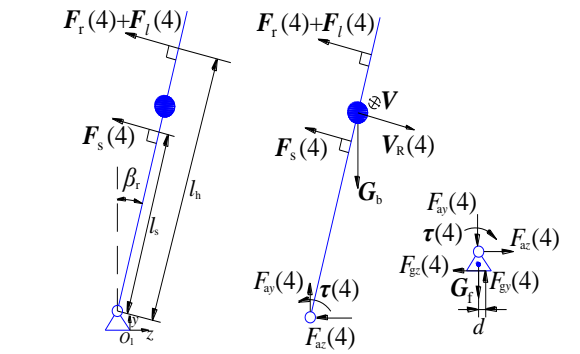
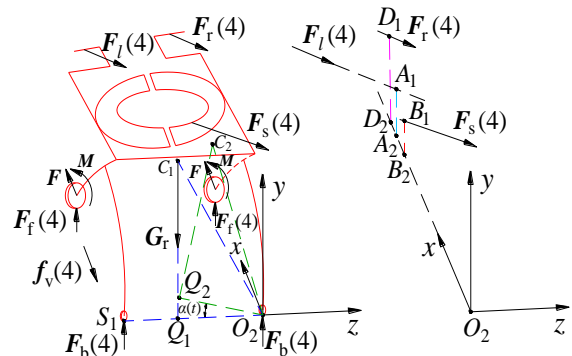


图 11 右倾情况人机系统示意图

对人体和助老机器人分别进行受力分析, 如图 12 所示。



(a) 人体受力分析



(b) 助老机器人受力分析

图 12 右倾情况人体与助老机器人受力分析图

图 12(a)中, 各参量表示的物理意义与前倾情况相同。对人体两环节分别建立动力学方程, 如式(11)所示。

$$\left. \begin{aligned} &|F_r(4) + F_l(4)| + |F_s(4)| + F_{ay}(4)\sin\beta_r - m_b l \ddot{\beta}_r \\ &= |G_b| \sin\beta_r - F_{az}(4)\cos\beta_r \\ &F_{ay}(4)\cos\beta_r - F_{az}(4)\sin\beta_r + m_b l \dot{\beta}_r^2 = |G_b| \cos\beta_r \\ &|F_r(4) + F_l(4)|l_h + |F_s(4)|l_s + |\tau(4)| = |G_b|l \sin\beta_r + m_b l^2 \ddot{\beta}_r \quad (11) \\ &F_{gz}(4) = F_{az}(4) \\ &F_{gy}(4) = F_{ay}(4) + |G_f| \\ &|\tau(4)| = F_{gy}(4)d - bF_{gz}(4) \end{aligned} \right\}$$

图 12(b)中, 机器人右后轮与地面的接触点为坐标原点 O_2 ; 水平向右为 z 轴正方向, 垂直地面向上为 y 轴正方向, 机器人右前、右后轮与地面

的接触点的连线为 x 轴, 其正方向符合右手法则。 S_1 为机器人左后轮与地面的接触点, 其它参量表示的物理意义与前倾情况相同。分别列出 $\alpha(t)$ 方向和 x 方向的动力学方程, 如式(12)所示。

$$\left. \begin{aligned} &|F_r(4)|l_{D_1D_2} + |F_l(4)|l_{A_1A_2} + |F_s(4)|l_{B_1B_2} - |G_r|l_{C_1O_2} \\ &\cos(\alpha(t) + \angle C_1O_2Q_1) + |F_b(4)|l_{S_1O_2} + |F_f(4)|l_{S_1O_2} = J\ddot{\alpha}(t) \\ &G_r = m_r g \\ &|F_b(4)| = k_b l_{S_1O_2} \alpha(t) + c_b l_{S_1O_2} \dot{\alpha}(t) \\ &|F_f(4)| = k_f l_{S_1O_2} \alpha(t) + c_f l_{S_1O_2} \dot{\alpha}(t) \\ &|F| - |f_v(4)| = m_r \ddot{x}(t) \\ &|f_v(4)| = c_v \dot{x}(t) \end{aligned} \right\} (12)$$

为了避免助老机器人发生右倾, 也需要同时满足动态稳定性约束条件: 式(5)和式(8); 助老机器人还需向后缓慢地停止移动完成对人体的保护步, 则机器人移动位移 $x(t)$ 稳定于较小的值, 机器人速度 $\dot{x}(t)$ 稳定于 0。

3 伴行模态防老年人跌倒的人机系统动态稳定性分析判断

3.1 助老机器人的动态稳定性分析

对以上 4 种情况中含动态稳定性约束条件的 $\alpha(t)$ 方向的微分方程分别进行求解。若微分方程存在有满足动态稳定性条件的解, 则表明助老机器人是稳定的。假设给定每一种情况下人体与助老机器人左右把手之间的合作用力和人体与助老机器人安全气囊之间的作用力, 如图 13 和图 14。

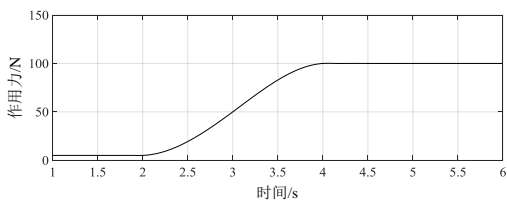


图 13 人体与助老机器人左右把手之间的合作用力

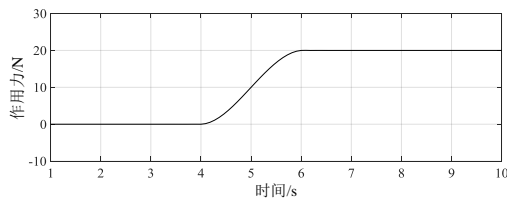


图 14 人体与助老机器人安全气囊之间的作用力

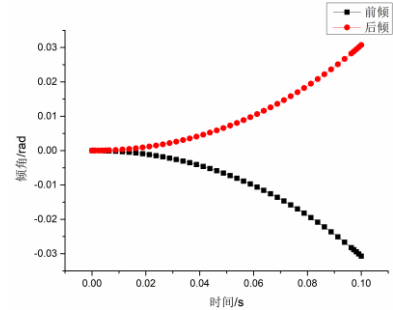
结合助老机器人的 SolidWorks 三维模型和物理样机测算, 获得助老机器人相关参数:

$$m_r = 92.2\text{kg}, \quad \angle C_1O_2Q_1 = 66.9^\circ, \quad l_{C_1O_2} = 0.792\text{m}, \\ J = 58.3\text{kg} \cdot \text{m}^2$$

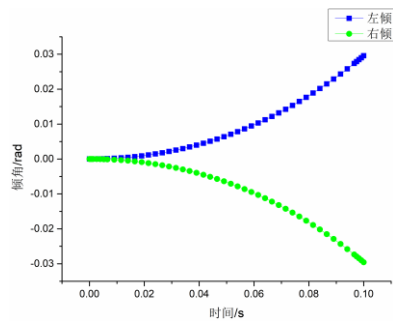
另, 采用参数识别法可获得刚度和阻尼参数:

$$k_b = 5.47 \times 10^7 \text{N/m}, \quad c_b = 572.41 \text{ N} \cdot \text{s/m}, \\ k_f = 6.69 \times 10^6 \text{N/m}, \quad c_f = 476.59 \text{ N} \cdot \text{s/m}$$

对以上 4 种情况, 分别对 $\alpha(t)$ 方向的微分方程进行求解, 求解结果如图 15 所示。



(a) 前、后倾情况微分方程解



(b) 左、右倾情况微分方程解

图 15 4 种情况微分方程解的曲线图

由图 15 可以看出, 4 种情况下均存在有 α 解, 且满足相应的动态稳定性约束条件。故在考虑人体突然发生跌倒时, 助老机器人是稳定的。

3.2 人体的动态稳定性分析

以最常见的前倾情况为例, β_f 为 30° 、 40° 、 50° 、 60° 和 70° ; 分别对人体动态稳定性进行评价, 判断人体质心-速度坐标经相应处理后是否都在其动态稳定性区域内, 评价结果如图 16 所示。由图 16 可见, 5 种倾角下人体质心-速度坐标经处理后均在其动态稳定性区域内, 故人体是稳定的。

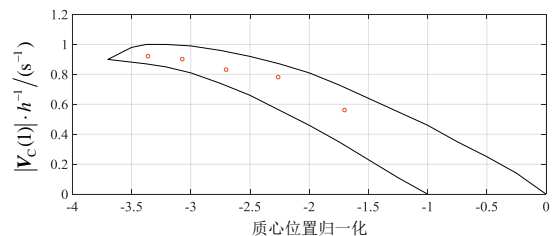


图 16 人体动态稳定性评价图

4 实验验证

为验证所建模型的正确性, 搭建如图 17 所示的实验平台, 主要由助老机器人系统、Arduino

UNO 以及两个 JY901 姿态角度传感器组成。图 17 中, 两 JY901 传感器分别用于采集助老机器人和人体的倾角, x_1, y_1 和 x_2, y_2 分别表示两 JY901 传感器对应的两轴; Arduino UNO 用于助老机器人行走控制和倾斜角度的数据读取。

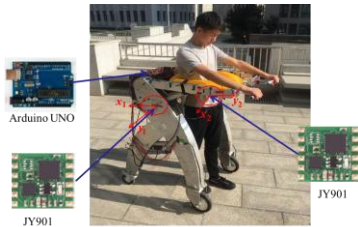
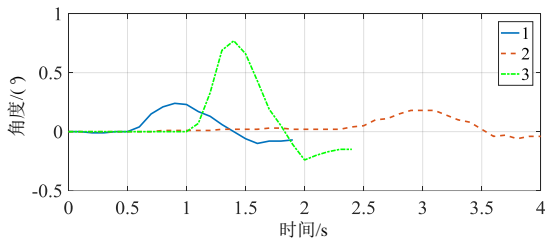
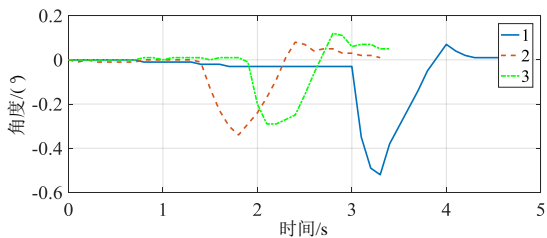


图 17 实验平台

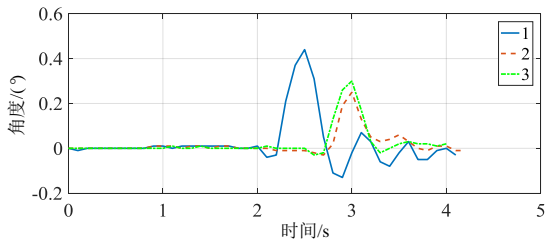
对上述 4 种情况, 每种情况分别进行 3 次实验, 限于篇幅, 只取每种情况下占据主导的倾斜角度, 实验结果如图 18 和图 19 所示。



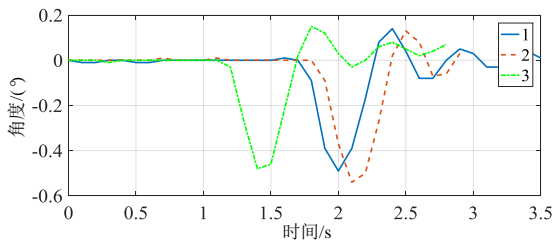
(a) 前倾情况绕 y_1 轴的倾斜角度



(b) 后倾情况绕 y_1 轴的倾斜角度



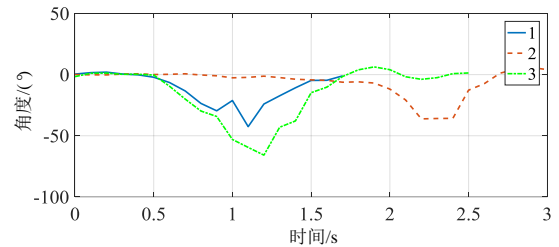
(c) 左倾情况绕 x_1 轴的倾斜角度



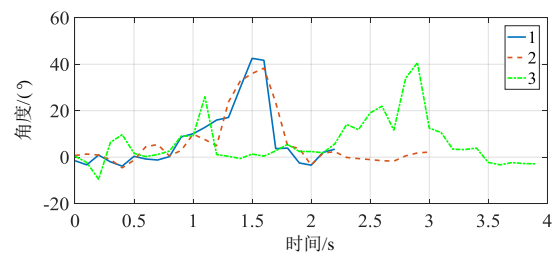
(d) 右倾情况绕 x_1 轴的倾斜角度

图 18 4 种情况助老机器人的倾斜角度图

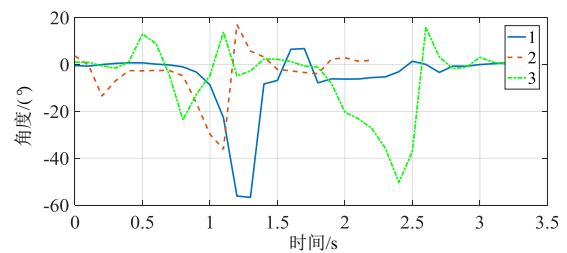
由图 18 可见, 4 种情况下助老机器人的倾斜角度均较小, 表明助老机器人不会发生前后、左右方向倾倒, 即助老机器人是稳定的。



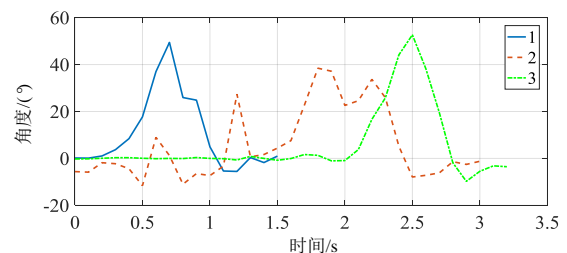
(a) 前倾情况绕 x_2 轴的倾斜角度



(b) 后倾情况绕 x_2 轴的倾斜角度



(c) 左倾情况绕 y_2 轴的倾斜角度



(d) 右倾情况绕 y_2 轴的倾斜角度

图 19 4 种情况人体的倾斜角度图

由图 19 可见, 4 种情况下人体发生跌倒时, 通过助老机器人缓慢地停止移动, 同时安全气囊打开, 人体倾斜角度在短时间内迅速下降至零度, 表明人体不会发生跌倒, 即人体也是稳定的。

从以上结果可以看出, 助老机器人和人体均是稳定的, 达到了防止人体跌倒的目的, 从而验证了以上所建模型的正确性。

5 结论

本文首先给出了人体倒立摆动力学模型, 通过 Matlab 软件计算了每一给定人体质心位置下的每一组最大和最小边界速度, 得到了人体动态稳定性区域, 并在此基础上, 分析了人体跌倒的可能形式; 其次, 从人体可能会发生的前倾、后倾、左倾和右倾 4 种情况, 结合助老机器人实际防止老年人跌倒的过程, 分别建立了伴行模式防老年人跌倒的人机系统动力学模型; 最后, 基于此模型, 在给定实例下分别对助老机器人和人体的动态稳定性进行了分析判断, 并搭建了实验平台, 对 4 种情况分别进行了实验, 验证了所建模型的正确性。结果表明, 人机系统是稳定的。进而得出了结论: 人体在使用助老机器人进行户外行走过程中, 能够起到防止人体跌倒的目的; 所建动力学模型为同类机器人的控制研究提供了理论基础, 有助于助老机器人实用化。

参考文献:

- [1] YAN Qingyang, HUANG Jian, TAO Chunjing, et al. Intelligent mobile walking-aids: perception, control and safety[J]. *Advanced Robotics*, 2020, 34(1): 2-18.
- [2] XU Wenxia, HUANG Jian, CHENG Lei. A novel coordinated motion fusion-based walking-aid robot system[J]. *Sensors*, 2018, 18(9):2761-00.
- [3] YAN Qingyang, HUANG Jian, XIONG Caihua, et al. Data-driven human-robot coordination based walking state monitoring with cane-type robot[J]. *IEEE Access*. 2018, 6: 8896-8908.
- [4] TAO Chunjing, YAN Qingyang, LI Yitong. Hierarchical shared control of cane-type walking-aid robot[J]. *Journal of Healthcare Engineering*, 2017, 2017.
- [5] SONG Kaitai, JIANG Sinyi, WU Shangyang. Safe guidance for a walking-assistant robot using gait estimation and obstacle avoidance[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2017, 22(5): 2070-2078.
- [6] WANG Tianyi, JEONG H, OHNO Y. Evaluation of self-reliance support robot through relative phase[J]. *IEEE Access*, 2017, 5:17816-17823.
- [7] CIFUENTES CA, RODRIGUEZ C, FRIZERA-NETO A, et al. Multi-modal human-robot interaction for walker-assisted gait[J]. *IEEE Systems Journal*. 2016, 10(3):933-943.
- [8] JIANG Sinyi, LIN Chenyang, HUANG Kotung, et al. Shared control design of a walking-assistant robot[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2017, 25(6):2143-2150.
- [9] MOON M K, KIM S C. Usability Evaluation of movement support service robot for elderly [M]. *Advances in Ergonomics Modeling, Usability & Special Populations*, Florida, USA: Springer, Cham, 2017:517-526.
- [10] LEE G, OHNUMA T, CHONG N Y, et al. Walking intent-based movement control for JAIST active robotic walker[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2014, 44(5): 665-672.
- [11] 徐文霞, 黄剑, 晏管阳, 等. 兼备柔顺与安全的助行机器人运动控制研究[J]. *自动化学报*, 2016, 42(12): 1859-1873.
XU Wenxia, HUANG Jian, YAN Qingyang, et al. Research on walking-aid robot motion control with both compliance and safety[J]. *Acta Automatic Sinica*, 2016, 42(12): 1859-1873.
- [12] 吕韞琦. 助行机器人及其控制系统研究[D]. 北京:北京理工大学, 2016.
LV Yunqi. Study on walking companion robot and control technologies [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.
- [13] NAKAGAWA S, HASEGAWA Y, FUKUDA T, et al. Tandem stance avoidance using adaptive and asymmetric admittance control for fall prevention[J]. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 2016, 24(5): 542-550.
- [14] DI Pei, HASEGAWA Y, NAKAGAWA S, et al. Fall detection and prevention control using walking-aid cane robot[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2016, 21(2): 625-637.
- [15] GERAVAND M, RAMPELTSHAMMER W, PEER A. Control of mobility assistive robot for human fall prevention[C]// *Proceedings of IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics*, Singapore: IEEE, 2015:882-887.
- [16] 穆小奇, 张小栋, 王亚宾, 等. 助老机器人伴行模式人机耦合系统的耐冲击振动特性分析[J]. *振动与冲击*, 2020, 39(2): 22-31.
MU Xiaoqi, ZHANG Xiaodong, WANG Yabin, et al. Impact vibration resistance characteristics of a

- human-robot couple system for controlling the walking posture of an elderly-assistant robot[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2020, 39(2): 22-31.
- [17] PAI Yichung, PATTON J. Center of mass velocity-position predictions for balance control[J]. *Journal of Biomechanics*, 1997, 30(4): 347-354.
- [18] PAI Yichung, IQBAL K. Simulated movement termination for balance recovery: can movement strategies be sought to maintain stability in the presence of slipping or forced sliding?[J]. *Journal of Biomechanics*, 1999, 32(8): 779-786.
- [19] 李世明, PAI Yichung, YANG Feng, 等. 人体动态稳定性理论及防跌倒扰动训练进展[J]. *体育科学*, 2011, 31(4): 67-74.
- LI Shiming, PAI Yichung, YANG FENG, et al. Development of dynamic stability theory of human body and perturbation training for fall prevention[J]. *China Sport Science*, 2011, 31(4): 67-74.
- [20] WINTER D A. *Biomechanics and motor control of human movement* [M]. Fourth Edition, Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2009: 82-106.

(编辑 刘杨)