

# SMA 驱动的二自由食指康复外骨骼机器人设计与建模

张佳琦<sup>1,2,3</sup>, 葛蛟<sup>1</sup>, 李敦超<sup>1</sup>

(1. 沈阳理工大学 机械工程学院, 沈阳 110159; 2. 东北大学 机械工程学院, 沈阳 110819;  
3. 迈得医疗工业设备股份有限公司, 浙江 台州 317607)

**摘要:** 针对现有康复装置关节运动解耦不足、动态补偿欠缺及驱动效率低下等问题, 提出一种基于形状记忆合金(SMA)驱动的二自由度刚性手指外骨骼创新设计。通过建立包含掌指关节(MCP)和近端指间关节(PIP)的仿生运动链, 采用差动传动机构实现食指关节运动解耦, 结合动力学前馈算法, 提升系统动态性能和康复效果。创新性拓扑优化框架结构在保证输出力足够的条件下, 使单指模块重量仅 65 g。实验表明, 该系统 MCP 关节屈伸范围达  $-7^{\circ} \sim 72^{\circ}$ , PIP 关节屈伸范围为  $0^{\circ} \sim 76^{\circ}$ , 相较于传统疗法, 输出力的均方根值提升了 83.1%, 屈伸速度提高 29.4%, 临床评估显示运动功能评分提升了 42%。研究证实该外骨骼在运动精度、力量输出和穿戴舒适性方面较现有系统具有显著优势, 为手功能康复提供了新的技术解决方案。

**关键词:** 食指康复; 四杆机构; 二自由度解耦; 形状记忆合金

中图分类号: TP249

文献标志码: A DOI:10.3969/j.issn.1003-1251.2026.01.010

## Design and Modeling of a SMA-driven Two-degree-of-freedom Exoskeleton Robot for Index Finger Rehabilitation

ZHANG Jiaqi<sup>1,2,3</sup>, GE Jiao<sup>1</sup>, LI Dunchao<sup>1</sup>

(1. Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China; 2. Northeastern University, Shenyang 110819, China;  
3. Maider Medical Industrial Equipment Co., Ltd., Taizhou 317607, China)

**Abstract:** To address the problems of insufficient decoupling of joint motions, lack of dynamic compensation and low driving efficiency of existing rehabilitation devices, an innovative design of a two-degree-of-freedom rigid finger exoskeleton based on shape memory alloy (SMA) drive is proposed. By creating a bionic kinematic chain that includes the metacarpophalangeal joint (MCP) and proximal interphalangeal joint (PIP), and employing a differential drive mechanism for decoupling the index finger joint motion, combined with a kinetic feedforward algorithm, the system's dynamic performance is enhanced to improve rehabilitation outcomes. The topology-optimized frame structure ensures that the single-finger module weighs just 65 g while providing sufficient output force. Experimental results indicate that the MCP joint achieves a flexion and extension range of  $-7^{\circ}$  to  $72^{\circ}$ , and the PIP joint ranges from  $0^{\circ}$  to  $76^{\circ}$ . Additionally, the root-mean-square (RMS) output force increases by 83.1%, flexion and extension speed improves by 29.4%, and the motor function score in clinical evaluations rises by 42% compared to traditional therapy. Overall, the findings confirm

that this exoskeleton significantly outperforms existing systems in movement accuracy, force output, and wearing comfort, offering a promising new solution for hand function rehabilitation.

**Key words:** rehabilitation of index finger; four-bar mechanism; decoupling two-degree-of-freedom; shape memory alloy

手部作为人体最精密的运动器官之一,其功能恢复对于改善运动功能障碍患者的生活质量具有重要意义<sup>[1]</sup>。在众多手部康复技术中:柔性外骨骼受限于材料强度,导致输出力不足<sup>[2]</sup>;刚柔耦合系统结构复杂,运动难以控制<sup>[3]</sup>;刚性手指外骨骼凭借其稳定的力学性能和精确控制,能有效增强力量并恢复抓握与运动功能<sup>[4]</sup>,在神经康复中具有重要临床价值。

目前,刚性手指外骨骼研究取得了显著进展:文献[5]开发的曲柄摇杆驱动系统,实现了便携式主动训练;文献[6]设计的连杆机构通过双向力反馈系统拓展了运动范围控制;文献[7]提出的线性驱动模块优化了屈伸运动精度。然而,现有系统普遍存在驱动效率与轻量化设计的矛盾。例如:传统电机驱动方案虽能提供充足扭矩,但系统重量往往超过 300 g,严重影响穿戴舒适性;气动驱动虽能减轻重量,却难以满足高频次康复训练所需的动态响应<sup>[8]</sup>。

形状记忆合金(SMA)驱动技术为解决这一矛盾提供了新思路,该材料具有高能量密度<sup>[9]</sup>和应变恢复特性,使其在保持刚性外骨骼结构优势的同时,可实现驱动系统的轻量化革新<sup>[10]</sup>。文献[11]通过 SMA 弹簧与刚性框架的混合驱动设计,将系统重量降低至 180 g,且保持 3 N 的持续抓握力输出。文献[12]研发的 SMA 驱动手套通过双线性比例-积分-微分控制(PID)策略,将迟滞误差控制在 8% 以内,验证了智能材料在精密控制中的可行性。但现有研究多聚焦于单自由度系统,未能充分实现对手指多关节协同运动的解剖学适配。

本文提出一种基于 SMA 驱动的双自由度刚性手指外骨骼设计,旨在解决康复设备的三个核心问题:关节运动独立性不足;动态响应补偿缺失;驱动系统功率密度低下。其技术突破体现在:建立包含近端指间关节(PIP)和掌指关节(MCP)的仿生运动链,通过差动传动机构实现手指关节运动解耦;开发基于动力学前馈控制策略提升系统动态性能,提升康复效果;采用 3D 打印结构,在保证输出力的情况下将单指模块重量控制在 65 g 以内。通过生物力学仿真与临床测试验证本系统

的运动精度、力量输出和穿戴舒适性等性能,并与现有刚性外骨骼进行比较,以期对手功能康复提供新的技术解决方案。

## 1 外骨骼结构

### 1.1 手指的生理结构

手指关节是一种理想的刚性结构。除拇指外,其余手指的生理结构如图 1 所示,均包含近端指骨、中节指骨及远端指骨,分别经由 MCP、PIP 与远端指间关节(DIP)相连。

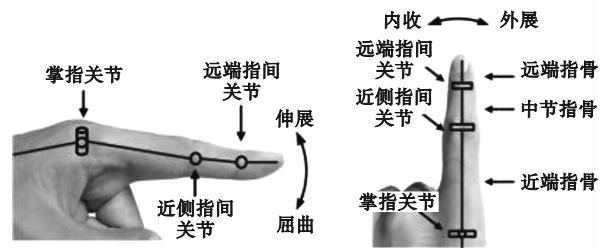


图 1 手指生理结构简图

Fig. 1 Simplified diagram of finger physiology

MCP 关节具有两个相互垂直的自由度,可实现近端指骨的屈伸(flexion/extension, f/e)及内收/外展(adduction/abduction, a/a)运动。而 PIP 与 DIP 关节仅有一个自由度,能够完成远端指骨的屈伸运动,且 MCP 与 PIP 关节的运动存在耦合关系。受手指生理结构的制约,手指关节的活动范围受到严格限制。依据人体手指关节运动相关数据,食指关节屈伸时各关节的活动范围详见表 1。

表 1 食指屈伸时各关节的活动范围

Table 1 Range of motion of each joint during flexion and extension of the index finger

关节名称	运动方式	活动范围
掌指关节	f/e	-11° ~ 88°
	a/a	-36° ~ 36°
近侧指间关节	f/e	0° ~ 82°

### 1.2 手指外骨骼设计

本文提出一款重量仅 450 g、专为食指康复设计的轻型 SMA 驱动外骨骼,其整体结构如图 2 所

示,该结构集四杆机构与齿轮机构于一体,确保运动符合生物力学特性,避免二次损伤。外骨骼总高 23 mm,采用 SMA - 偏置弹簧致动器配置,将

SMA 丝(最大应变 5%)与偏置弹簧结合,利用 SMA 相变与偏置弹簧储能释能特性,实现手指双向屈伸动作,同时简化组件结构。

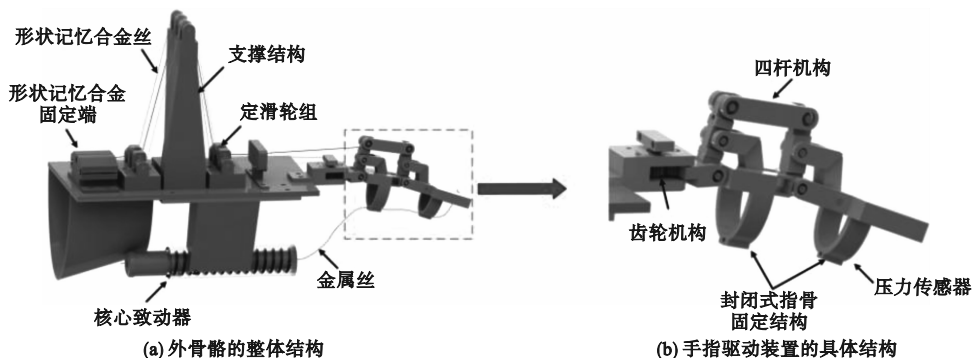


图 2 手部外骨骼的整体结构

Fig. 2 Hand exoskeleton overall structure

### 1.3 外骨骼参数分析

采用 Denavit-Hartenberg 方法为每个关节建立坐标系,对带有辅助连杆的四杆机构(见图 3)进行运动学建模,运动学方程为

$$\begin{cases} L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos \theta_2 = L_3 \cos \theta_3 + L_4 \cos \theta_4 \\ L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin \theta_2 = L_3 \sin \theta_3 + L_4 \sin \theta_4 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $L_1, L_2, L_3, L_4$  为连杆长度; $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$  为关节角度。采用混合优化策略整合遗传算法(GA)与序列二次规划(SQP),通过结合 GA 的全局搜索能力和 SQP 的局部优化精度,满足设计需求,实现均衡高效的解决方案。

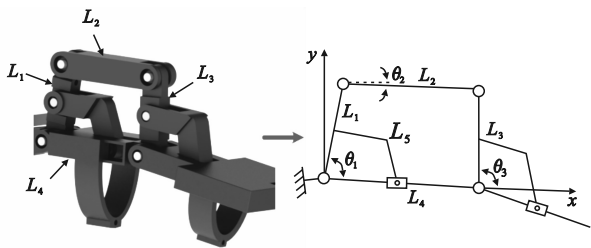


图 3 手指外骨骼四杆机构简图

Fig. 3 Finger exoskeleton four-bar mechanism diagram

### 1.4 手部外骨骼核心致动器设计

外骨骼的核心致动器结构如图 4 所示,图中  $L_b$  为弹簧原始长度。该结构由带外部保护壳的偏置弹簧和位于末端的推动部件组成,该部件采用由马氏体/奥氏体 SMA 线材和机械弹簧组成的双相能量转换机制。在手指弯曲时,触发加热会诱导 SMA 发生相变(奥氏体收缩),与手指弯曲同步,同时压缩弹簧以储存能量。储存的弹性能量在伸展过程中通过马氏体相变释放出来,并通过金属缆线传输以提供辅助,从而实现手指康复。

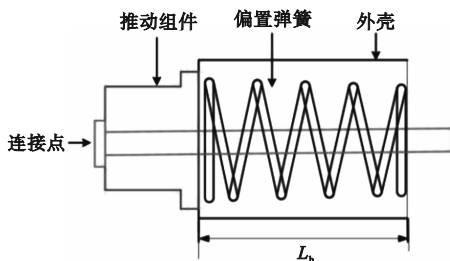


图 4 外骨骼核心致动器结构图

Fig. 4 Exoskeleton core actuator structure diagram

SMA 丝输出力( $F_{SMA}$ )的计算式为

$$F_{SMA} = \sigma \cdot A = [\sigma_0 + C_M(T - M_s)] \cdot \frac{\pi d^2}{4} \quad (2)$$

式中: $\sigma$  为 SMA 金属丝收缩时产生的应力; $A$  为 SMA 金属丝的横截面积; $\sigma_0$  是初始应力; $C_M$  为热交换系数; $T$  为当前温度; $M_s$  为马氏体开始转变温度; $d$  为形状记忆合金丝的直径。

相应的理论长度变化( $\Delta L$ )应与 MCP 关节所需的屈曲范围相匹配,其计算式为

$$\Delta L = \varepsilon_L \cdot L_0 \quad (3)$$

式中: $\varepsilon_L$  为 SMA 线的应变; $L_0$  为 SMA 线的初始长度。

偏置弹簧在 SMA 收缩时储存能量,并通过释放储存的能量帮助手指伸展。弹簧刚度( $k_s$ )通过优化平衡能量存储和用户的舒适性, $k_s$  取决于 SMA 的驱动力和冲程,其计算式为

$$k_s = \frac{F_{SMA}}{\Delta L} \quad (4)$$

SMA 和弹簧的耦合动力学的关系式为

$$mx'' + bx' + k_s x = F_{SMA}(T) - F_{human} \quad (5)$$

式中: $m$  为外骨骼连杆的有效质量; $b$  为阻尼系

数;  $x$  为弹簧的位移;  $F_{\text{human}}$  代表用户交互力。

## 2 数学模型

确定手部外骨骼的结构和驱动布局后,建立手部外骨骼数学模型,如图5所示,图中  $F_d$  为期望力,  $\xi$  为马氏体的体积分数,  $\varepsilon$  为应变,  $\sigma_{\text{SMA}}$  为 SMA 的应力。该模型作为控制系统的一部分,可以准确描述输入温度  $T$  和输出力  $F_o$  之间的关系。

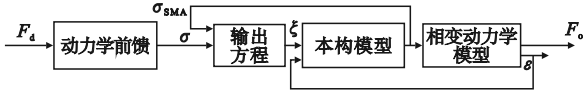


图5 手部外骨骼数学模型

Fig.5 Mathematical model of hand exoskeleton

### 2.1 本构模型

本文采用 Brinson 本构模型来描述 SMA 中应力、应变和温度之间的相互关系。为了获取 Brinson 参数数据,搭建形状记忆合金实验台,如图6所示。实验台由直线位移传感器(LVDT)、形状记忆合金、偏置弹簧、倍福控制器和 I/O 模块组成。LVDT 安装在核心驱动源上方,用于检测核心驱动源的收缩长度,由 PC 记录。热电偶将温度发送到倍福控制器进行实时控制。实验台使用绝缘螺丝使热电偶与 SMA 丝保持特定的相对位置,确保检测温度的准确性。

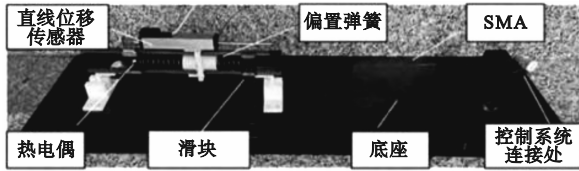


图6 形状记忆合金实验台

Fig.6 Shape memory alloys test bench

该模型利用当前的马氏体体积分数  $\xi$  和应变  $\varepsilon$  来计算 SMA 金属丝中的实时应力,其计算式为

$$\sigma' = (E_A + (\xi_s + \xi_T)(E_M - E_A))\varepsilon' + \Theta T' - \varepsilon_L E \xi_s' \quad (6)$$

式中:  $\sigma'$  表示 SMA 丝的实时应力,即当前状态下金属丝内部的应力;  $E_A$  表示 SMA 奥氏体相的弹性模量;  $E_M$  表示 SMA 马氏体相的弹性模量;  $\xi_s$  和  $\xi_T$  分别代表应力和温度引起的马氏体体积分数;  $\Theta$  为 SMA 的热弹性常数;  $T'$  为当前温度与转变温度之间的差值;  $\varepsilon'$  为当前应变。

### 2.2 相变动力学模型

相变动力学方程能够根据当前的温度和应力条件计算出 SMA 的马氏体体积分数。为了更好

地描述在复杂应力和温度情况下的体积分数变化,本文将原始的 Brinson 动力学模型与改进的模型相结合。根据当前应力  $\sigma$  和温度  $T$ ,由相变动力学方程可以计算出马氏体的体积分数  $\xi$ 。

### 2.3 输出方程

手部外骨骼的输出力  $F_o$  与 SMA 丝的应力  $\sigma$  的关系式为

$$F_o = 2\sigma \cdot A \quad (7)$$

### 2.4 前馈动力学模型

在手指外骨骼的工作机制中, SMA 线和偏置弹簧协同驱动手指运动。建模前,根据实际情况做如下假设。

1) SMA 线的力传递需要通过滑轮来实现,采用双滑轮对称布局,抵消侧向力对缆线张力的影响,确保驱动力传递效率。滑轮的阻力较小,不计摩擦损耗。

2) 手指的抓取动作主要是屈伸运动,因此只考虑手指在矢状面上的屈伸(f/e)运动,忽略手指在冠状面上的内收/外展(a/a)运动。

建立外骨骼拉格朗日动力学模型,具体方程为

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}_1} \right) - \frac{\partial L}{\partial \varphi_1} = Q \quad (8)$$

式中:  $L$  为拉格朗日函数,  $L = E - U$ ,  $E$  和  $U$  分别表示系统的总动能和势能;  $Q$  表示广义力。

外骨骼的总动能  $E$  可表示为

$$E = \frac{1}{2} I_0 \omega_0^2 + \sum_{i=1}^5 \frac{1}{2} I_i \omega_i^2 + \frac{1}{2} m_2 v_{s_2}^2 + \frac{1}{2} m_5 v_{s_5}^2 \quad (9)$$

式中:  $m_i$  和  $I_i$  分别为链节  $i$  的质量和惯性矩;  $I_0$  为食指的估计惯性矩矩阵;  $\omega_0$  为食指的角速度矢量;  $\omega_i$  为链节  $i$  的标量角速度;  $v_{s_i}$  为平移链节  $i$  的质量中心速度。

整个结构的重力势能  $U$  为

$$U = m_0 g h_0 + \sum_{j=1}^3 m_j g h_j + m_5 g h_5 \quad (10)$$

式中:  $h_0$  为食指质心的位置矢量;  $h_j$  为连杆  $j$  的质心位置矢量;  $h_5$  为连杆 5 的质心位置矢量。

根据公式(8),建立动力学模型为

$$Mq'' + Cq' + G = \tau \quad (11)$$

式中:  $M$  为转动惯量;  $q''$  为角加速度;  $C$  为阻尼系数;  $q'$  为角速度;  $G$  为重力矩;  $\tau$  为驱动力矩。

利用前馈模型,可以预先计算所需的驱动力,从而更精确地控制手指的屈伸运动。

## 3 实验验证与结果分析

本文通过实验验证手部外骨骼功能,并确保

其生成自然弯曲曲线,确保外骨骼在康复训练中的有效、安全与整体性能。首先,验证穿戴后手腕灵活性,确保不影响手部其他关节活动;然后,对比模拟与实际运动范围,验证设计可行性与有效性;其次,对比有无动力学前馈的压力传感器数据,评估动态前馈影响;最后,对比有无动态前馈的肌电信号与运行速度,评价其效果及康复能力。

### 3.1 验证穿戴外骨骼后手腕的灵活性

在验证外骨骼系统功能前,需确认其不会影响腕关节的活动度,为此开展受控实验定量评估潜在的运动限制。在此测试环境下,参与者按正确程序穿戴设备,在矢状面和冠状面完成规定腕关节运动(屈、伸、内收、外展)。利用摄像机及 Kinovea 软件,对手指运动过程进行量化分析。运动学分析显示,各平面关节活动范围(ROM)无变化,屈伸平均角位移为  $63.2^{\circ} \pm 4.1^{\circ}$ ,内收外展平均角位移为  $35.8^{\circ} \pm 3.7^{\circ}$ ,均在无辅助活动度标准范围 5% 内,未见明显限制,表明外骨骼集成无临床相关不利影响。同时,可用性验证显示,穿戴程序高效,参与者用时 16.3 s ( $n=15$ ,  $n$  为检测次数)完成系统集成,满足时间敏感的临床康复需求。

### 3.2 外骨骼的运动范围

为验证手部外骨骼设计的可行性与有效性,确保其安全匹配正常手指的运动范围,本文采用

如下流程验证。

首先,通过 MATLAB 实施运动学仿真确定理论活动范围,继而使用高速摄像系统记录 f/e 及 a/a 运动,最终通过 Kinovea 软件完成运动学分析,外骨骼的运动范围仿真结果如图 7 所示。

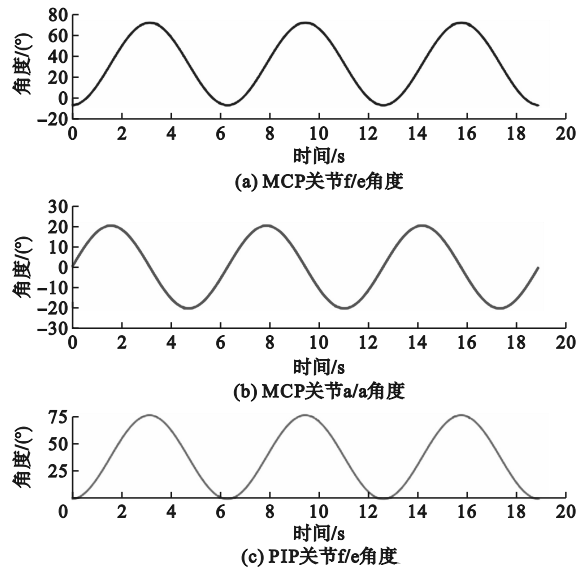


图 7 外骨骼的运动范围仿真

Fig. 7 Simulation of range of motion of exoskeleton

由图 7 可知:MCP 关节 f/e 角度为  $-4^{\circ} \sim 63^{\circ}$ ,a/a 范围达  $\pm 21^{\circ}$ ;PIP 关节 f/e 角度为  $0^{\circ} \sim 74^{\circ}$ 。实际运动测量时,通过矢状面正前方 50 cm 处设置的摄像系统采集运动数据,经 Kinovea 软件解析的食指外骨骼运动范围如图 8 所示。

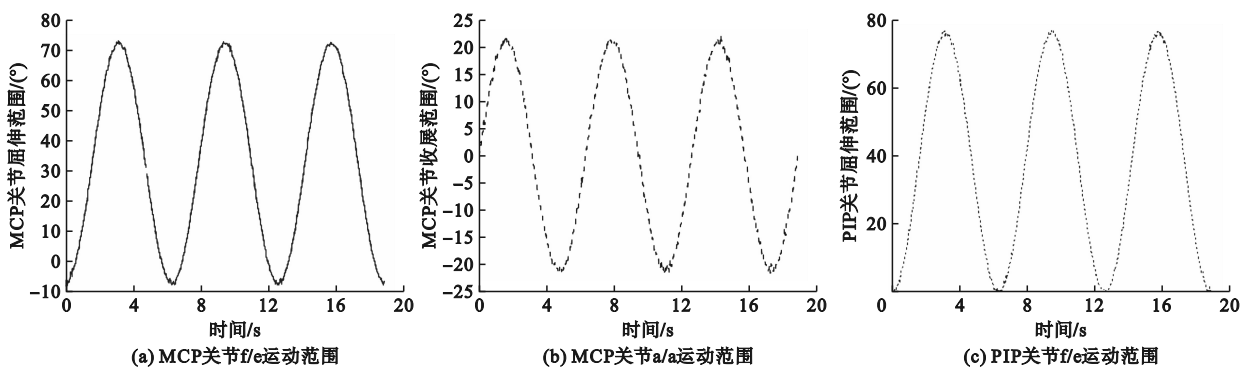


图 8 食指外骨骼的运动范围

Fig. 8 Range of motion of the index finger exoskeleton

由图 8 可知:MCP 关节 f/e 角度扩展至  $-7^{\circ} \sim 72^{\circ}$ ,a/a 保持  $\pm 21^{\circ}$  动态范围;PIP 关节 f/e 范围显著提升至  $0^{\circ} \sim 76^{\circ}$ 。

实验数据表明,理论仿真与实测运动范围偏差小于 8.2%,验证了外骨骼设计的生物力学合理性。相较于健康食指正常运动范围(见 2.1 节表

1),该装置能够为康复训练提供充足活动空间,有效帮助中风患者突破现有活动度限制。

### 3.3 外骨骼输出力测试实验

为定量评估外骨骼控制系统效能,本文采用薄膜压力传感器对周期性 f/e 运动中的力学特性进行表征。屈伸过程中的压力如图 9 所示。由图

9可见,加入动力学前馈后输出力明显提升。

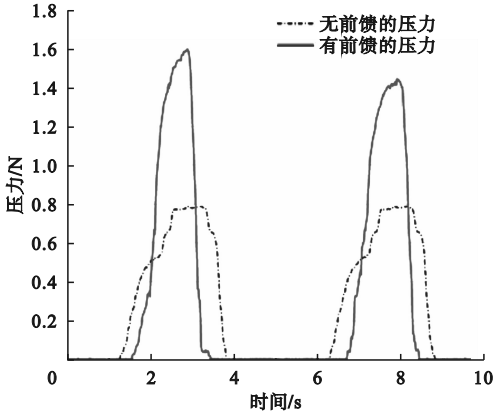


图9 压力传感器示数

Fig. 9 Pressure sensor indication

抓握实验结果如图10所示。由图10可见,该系统能够满足日常生活中的多种功能性需求,包括大直径圆柱抓取、小直径物体抓取以及捏取操作等典型动作场景。上述生物力学性能的提升源于动力学前馈算法,该算法通过整合外骨骼动力学模型至控制系统,有效增强了系统动态响应特性。

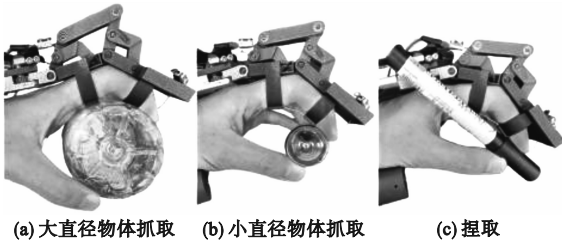


图10 物体抓握实验

Fig. 10 Object grasping experiment

### 3.4 动力学前馈性能验证

为了测试外骨骼性能,在手指屈伸过程中对比有无动态前馈的情况,对运动速度及肌电信号进行分析。对运动过程分析,无动态前馈时运动速度为 $0.17 \text{ rad/s}$ ,而采用动态前馈控制后提升至 $0.22 \text{ rad/s}$ ,表明该模型可有效提升外骨骼运动性能。

肌电信号(EMG)采集系统如图11所示,该系统由表面电极、导线、蓝牙接收器和肌电信号传感器构成。

受试者分别使用有、无动力学前馈的外骨骼完成动作,并分别记录对应的肌电信号,对比结果如图12所示。

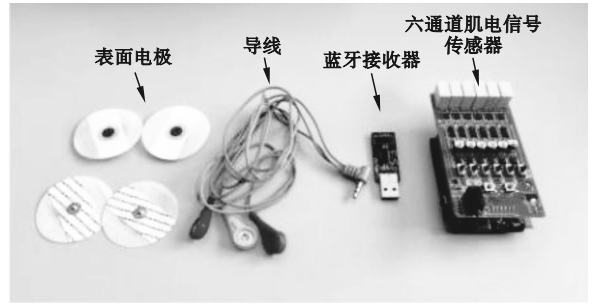


图11 肌电信号采集系统

Fig. 11 EMG signals acquisition system

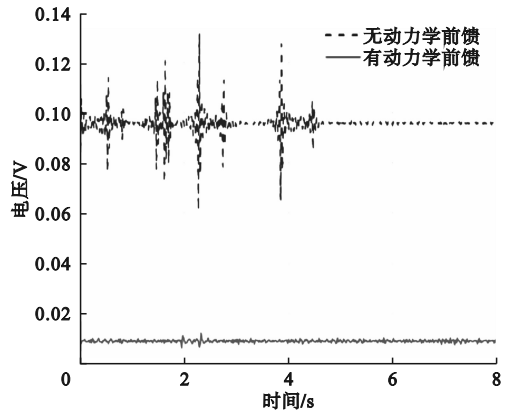


图12 手指屈伸过程中肌电信号结果

Fig. 12 Results of EMG signals during finger flexion and extension

由图12可知,动态前馈控制的引入使肌电信号振幅显著降低,信号稳定性提升,表明肌肉负荷降低且运动协调性得到改善。动态前馈控制不仅降低振幅波动,还可提升动作执行的准确性和重复性。

## 4 结论

本文基于动力学前馈控制的SMA驱动二自由度手部外骨骼设计,建立MCP和PIP仿生运动链,采用差动传动机构实现食指关节运动解耦,得出如下结论。

1)整合Brinson本构模型和拉格朗日动力学理论,外骨骼的输出力增加了 $77.8\%$ , $f/e$ 速度提升了 $29.4\%$ ,显著提升了外骨骼性能。且动态前馈控制优化系统响应,降低了屈指浅肌肌电信号幅值,提升了肌电信号的稳定性和运动协调性。

2)结合SMA驱动与动力学前馈控制,提升了系统的性能和康复效果,表现为:整体重量仅 $420 \text{ g}$ ,实现了轻量化设计;功率密度为 $8.2 \text{ W/g}$ ,优于传统电机方案(功率密度为 $6.1 \text{ W/g}$ );MCP关节和

PIP 关节活动范围分别达  $-7^{\circ} \sim 72^{\circ}$  和  $0^{\circ} \sim 76^{\circ}$ , 覆盖正常生理范围的 89% ~ 93%, 关节活动度表现优异。外骨骼系统在促进手指功能恢复方面效果显著。

后续研究计划融合形状记忆聚合物隔热层与模型预测控制算法, 开发 SMA 自感知功能以减少传感器依赖, 针对 SMA 相变迟滞致运动频率限于 0.48 Hz、控制框架缺乏个体适应性、持续加热超 30 min 或引发热不适等问题进行改进。

## 参考文献 (References):

- [1] KASHEF S R, AMINI S, AKBARZADEH A. Robotic hand: a review on linkage-driven finger mechanisms of prosthetic hands and evaluation of the performance criteria[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2020, 145: 103677.
- [2] NORONHA B, ACCOTO D. Exoskeletal devices for hand assistance and rehabilitation: a comprehensive analysis of state-of-the-art technologies[J]. *IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics*, 2021, 3(2): 525 - 538.
- [3] HEO P, GU G M, LEE S J, et al. Current hand exoskeleton technologies for rehabilitation and assistive engineering[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2012, 13(5): 807 - 824.
- [4] ACHILLI G M, AMICI C, DRAGUSANU M, et al. Soft, rigid, and hybrid robotic exoskeletons for hand rehabilitation: roadmap with impairment-oriented rationale for devices design and selection[J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(20): 11287.
- [5] VALAYIL T P, TANEV T K. Optimal design of a bilateral stand-alone robotic motion-assisted finger exoskeleton for home rehabilitation[J]. *Machines*, 2024, 12(10): 685.
- [6] IQBAL J, KHAN H, TSAGARAKIS N G, et al. A novel exo-

skeleton robotic system for hand rehabilitation-conceptualization to prototyping[J]. *Biocybernetics and Biomedical Engineering*, 2014, 34(2): 79 - 89.

- [7] GUO K, LU J X, LIU C, et al. Development, research, optimization and experiment of exoskeleton robot for hand rehabilitation training[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(20): 10580.
- [8] 张禹泽, 赵竞夫, 赵振伟, 等. 面向多关节训练的并联柔索驱动下肢康复机器人设计与分析[J]. *机械工程学报*, 2024, 60(17): 111 - 122.  
ZHANG Y Z, ZHAO J F, ZHAO Z W, et al. Design and analysis of a parallel cable driven lower limb rehabilitation robot for multi joints training[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2024, 60(17): 111 - 122. (in Chinese)
- [9] 王扬威, 吕佩伦, 郑舒方, 等. SMA 驱动手指康复机器人模糊自适应控制方法研究[J]. *重庆理工大学学报(自然科学)*, 2023, 37(2): 316 - 323.  
WANG Y W, LYU P L, ZHENG S F, et al. Research on the fuzzy adaptive control method for SMA-driven finger rehabilitation robots[J]. *Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science)*, 2023, 37(2): 316 - 323. (in Chinese)
- [10] 刘辛军, 于靖军, 谢福贵, 等. 行为机构学与高端装备创新设计[J]. *机械工程学报*, 2023, 59(19): 202 - 212.  
LIU X J, YU J J, XIE F G, et al. Behaviour-based mechanism and the innovative design of high-end equipment[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2023, 59(19): 202 - 212. (in Chinese)
- [11] LAI J W, SONG A G, SHI K, et al. Design and evaluation of a bidirectional soft glove for hand rehabilitation-assistance tasks[J]. *IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics*, 2023, 5(3): 730 - 740.
- [12] SERRANO D, COPACI D, ARIAS J, et al. SMA-based soft exo-glove[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2023, 8(9): 5448 - 5455.

(责任编辑:徐淑姣)

## (上接第 56 页)

- [20] JIN Y G. Research on path planning of airport VIP service robot based on A\* algorithm and artificial potential field method [C]//2021 5th Asian Conference on Artificial Intelligence Technology (ACAIT). Haikou, China: IEEE, 2021: 485 - 489.
- [21] 苏欣欣, 王红卫, 秦虎, 等. 混合启发式算法求解多配送人员车辆路径问题[J]. *运筹与管理*, 2022, 31(2): 42 - 47.  
SU X X, WANG H W, QIN H, et al. Hybrid heuristic algorithm for the vehicle routing problem with multiple delivery-

men[J]. *Operations Research and Management Science*, 2022, 31(2): 42 - 47. (in Chinese)

- [22] 陈亚萍, 王楠, 洪华杰, 等. 面向多无人平台区域监视任务的信息素正向激励栅格方法[J]. *兵工学报*, 2023, 44(9): 2858 - 2870.  
CHEN Y P, WANG N, HONG H J, et al. Pheromone positive incentive grid method for multi- unmanned platform regional surveillance task[J]. *Acta Armamentarii*, 2023, 44(9): 2858 - 2870. (in Chinese)

(责任编辑:宋颖韬)