沈亦纯，王殊轶，申雨涵，等. 基于坐位调膝法的可穿戴式推拿装置设计研究［J］. 智能计算机与应用，2026，16(7)：181-186. DOI：10.20169/j.issn.2095-2163.24111403

# 基于坐位调膝法的可穿戴式推拿装置设计研究

沈亦纯[1]，王殊轶[1]，申雨涵[1]，邢 华[2]，龚 利[2]，樊 琳[3]
（1 上海理工大学 健康科学与工程学院，上海 200093；2 上海中医药大学 附属岳阳中西医结合医院推拿科，上海 201203；
3 上海市医疗器械检验研究院，上海 201318）

**摘 要**：本研究旨在开发一款基于坐位调膝法的可穿戴式仿生推拿装置，用于膝骨关节炎（Knee OsteoArthritis，KOA）患者的推拿治疗。该装置通过结合气囊加压技术和粒子群优化-反向传播神经网络（Particle Swarm Optimization-Back Propagation neural network，PSO-BP）预测算法，实现对患者膝关节的个性化推拿治疗，以辅助或替代人类推拿医师，提高治疗效率，缓解医疗资源紧张的现状，并保护医师的职业健康。研究采用了 120 例 KOA 患者的数据，通过 PSO-BP 预测坐位调膝法的输出推拿力。装置设计包括结构设计和驱动系统设计，其中结构设计采用气囊加压推动球形按摩头以实现力度输出，驱动系统设计包含流量监控模块、LCD 显示模块、输出力监控模块、角度采集模块以及充放气控制模块。实验结果显示，按摩头在 *xoz* 平面上的位移误差较小，且在患者位姿变化时，能够有效跟踪穴位，显示出良好的定位精度。在力学输出验证方面，装置能够部分仿真医师的推拿手法，在穴位定位和力学输出方面表现出良好的性能。

**关键词**：坐位调膝法；推拿装置；推拿机器人；PSO-BP 算法；膝骨关节炎
**中图分类号**：TP302 **文献标志码**：A **文章编号**：2095-2163(2026)07-0181-06

# Study on the design of a wearable massage device based on the seating knee-adjustment manipulation

SHEN Yichun[1], WANG Shuyi[1], SHEN Yuhan[1], XING Hua[2], GONG Li[2], FAN Lin[3]
(1 School of Health Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2 Department of Massage, Yueyang Hospital of Integrated Traditional Chinese and Western Medicine, Shanghai University of Traditional Chinese Medicine, Shanghai 201203, China; 3 Shanghai Institute of Medical Device Testing, Shanghai 201318, China)

**Abstract**: This study aims to develop a wearable bionic massage device based on the seating knee-adjustment manipulation for the massage treatment of patients with Knee OsteoArthritis (KOA). The device integrates airbag pressure technology and Particle Swarm Optimization-Back Propagation neural network (PSO-BP) prediction algorithm to provide personalized massage treatment for the knee joints of patients, assisting or replacing human massage physicians. This approach is intended to improve treatment efficiency, alleviate the strain on medical resources, and protect the occupational health of physicians. The study utilizes data from 120 KOA patients to predict the output massage force of the seating knee-adjustment manipulation using the PSO-BP algorithm. The device design includes structural and drive system designs. The structural design employs airbag pressure to drive a spherical massage head for force output, while the drive system design comprises modules for flow monitoring, LCD display, output force monitoring, angle acquisition, and air inflation/deflation control. Experimental results indicate that the displacement error of the massage head in the *xoz* plane is minimal, and it can effectively track acupoints during changes in patient posture, demonstrating good positioning accuracy. In terms of mechanical output validation, the device can partially simulate the massage techniques of physicians. The device shows good performance in acupoint positioning and mechanical output.

**Key words**: seating knee-adjustment manipulation; massage device; massage robot; Particle Swarm Optimization-Back Propagation neural network algorithm (PSO-BP); Knee OsteoArthritis (KOA)

**基金项目**：上海市“科技创新行动计划”医学创新研究专项(23Y11921700)；上海市卫生健康委员会卫生行业临床研究专项(20234Y0077)；上海理工大学生物医学工程卓越工程师联合培养实践基地(10-23-308-007)。

**作者简介**：沈亦纯(2000—)，女，硕士研究生。主要研究方向：康复机器人，人因工程设计，可用性测试，增强现实手术导航。
**通信作者**：王殊轶(1972—)，女，博士，副教授，硕士生导师。主要研究方向：人因工程设计，可用性测试，增强现实/虚拟现实辅助医疗。Email：wangshuyi@usst.edu.cn。

**收稿日期**：2024-11-14

## 0 引 言

中国正经历着人口快速老龄化的过程，膝骨关节炎(Knee OsteoArthritis，KOA)等慢性疾病成为影响老年人健康的重要因素之一[1]。一项发表在《柳叶刀风湿病学》上的研究发现对于 70 岁以上的老年人来说，骨关节炎在导致残障年数(YLD)的原因中排名第七[2]。

2020 年“中医推拿治疗膝骨关节炎技术规范研究”课题组发表《膝骨关节炎中医推拿治疗技术规范专家共识》，这一关键文件意味着以内外并治为特色的中医疗法在膝骨关节炎治疗领域逐步迈向标准化与规范化[3]。以技术规范共识为基础诞生了诸多特定治疗手法用于提升治疗效果。其中，上海中医药大学附属岳阳中西结合医院推拿科主任龚利医生发明了坐位调膝法[4]。诸项研究分别从思路来源、治疗理念以及具体临床应用等方面证明了坐位调膝法的先进性[5-7]。

传承工作的最大阻力来源于中国当前的医患比失衡问题。“口口相传-手把手讲解-纠正规范-工作中提高”学习路径仍然是执业推拿医师推拿临床主要应用技术的来源，较高的学习时长使能熟练独立操作推拿手法的医师不能满足日益增长的临床需求[8-9]。

基于上述命题，有团队展开了相关研究。马邦峰等学者[10]设计了一款推拿装置，但目前该装置的局限性较大，其设计不够便携，治疗方式单一，输出力不能个性化适应各类病况患者。因此，本研究进一步结合坐位调膝法手法特性，设计了一款可穿戴式仿生推拿装置。该装置使用气囊装置辅助无极化力学输出，结合 PSO-BP 预测算法实现基于患者个体信息的个性化治疗系统[11-13]。

## 1 手法解析

### 1.1 坐位调膝手法概述

坐位调膝手法是一种专门针对 KOA 的中医推拿治疗技术，在继承传统推拿学术观点的基础上，结合了按法与患者的主动运动、术者的阻抗运动及关节附属运动，形成的一种适宜技术[14]。坐位调膝法的治疗原理是通过在膝关节生理活动范围内屈伸时对其胫股关节和髌骨关节进行松动，推动髌骨顶纠正其在屈伸活动时的运动轨迹，以调整下肢力线，调节膝关节内机械负荷分布，从而改变局部应力的集中点，缓解患者膝痛症状，提升其生活质量[15-17]。临床研究表明，坐位调膝法在即刻疗效和疼痛改善方面优于传统手法[18]。

### 1.2 手法采集实验

推拿力数据集的构建，包括个体患者信息、医学影像数据、实时位姿数据和推拿医师的推拿力。研究采用 FSR 薄膜压力传感器与 IM948 十轴姿态传感器模块搭建手法采集系统[19-21]。为保证实验过程的安全性，IM948 传感器经由蓝牙收发模块与上位机连接。图 1 展示了实验所使用的传感器与佩戴设计。

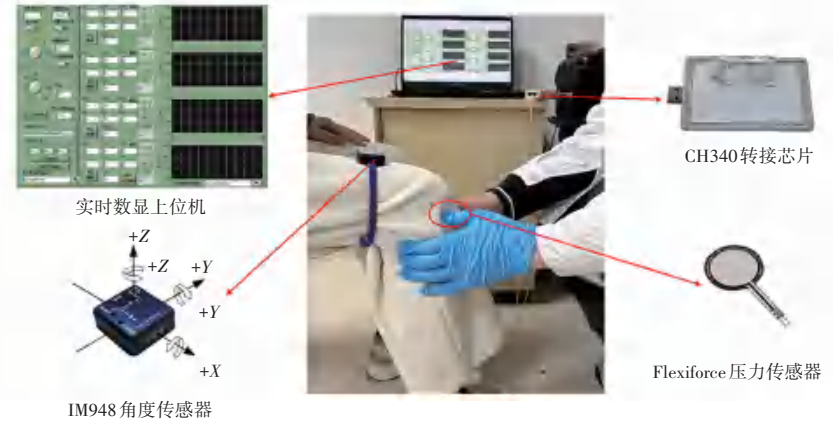



**图 1 手法采集系统设计**

**Fig. 1 Design of manipulation acquisition system**

## 2 推拿装置设计

### 2.1 可穿戴式推拿装置结构设计

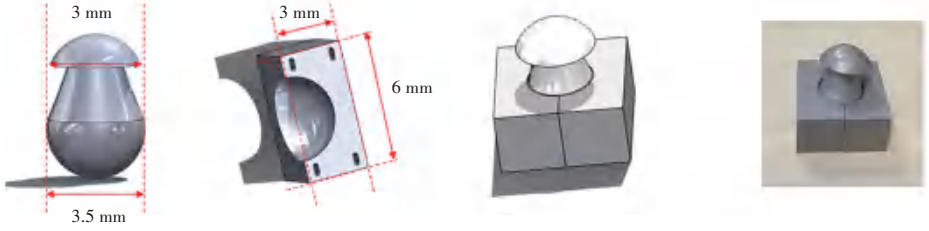
可穿戴式推拿装置采用气囊加压推动球形按摩头以实现力度输出，其技术设计系统如图 2 所示。球形按摩头被设计实施按摩动作，而定位内胆则确保按摩头能够准确定位到治疗区域。球形关节的活动度确保在患者位姿改变时，按摩头仍能跟踪按摩部位移动[22-24]。其设计建模如图 3 所示。内置气囊的作用在于提供额外的压力和支撑，可以根据需

要充气或放气，以适应不同用户的需求[25-26]。设计气囊为双层结构，底层气囊起到对于膝盖的包覆固定作用，同时增大充气体积使推拿力可控。图 4 展示了未安装执行机构的外壳建模。该转轴连接确保了在姿势切换时装置具有足够的稳定性。




**图 2　可穿戴推拿装置系统设计简图**

**Fig. 2　Sketch of wearable massage device system design**




（a）膝眼穴按摩头　（b）按摩头连接关节（部分）　（c）球形关节按摩头建模　（d）球形关节按摩头实物

**图 3　球形关节按摩头设计**

**Fig. 3　Design of spherical joint massage head**



（a）可穿戴式外壳建模　（b）可穿戴式推拿装置实物

**图 4　可穿戴式外壳建模**

**Fig. 4　Wearable shell modeling**

## 2.2　可穿戴式推拿装置驱动系统设计

系统的核心为充放气控制模块。其中，三通电磁阀与微型气泵在单片机控制下实现充气进程与放气进程的切换[27-28]。不同流速的设置决定了双层内置气囊的体积变化并最终反映为患者膝眼穴的受力情况改变。输出力监控模块、弯曲度采集模块由 Flexiforce 薄膜压力传感器、Flex Sensor4. 5 弯曲度传感器及其转换器组成，分别检测按摩头前端所受患者的反作用力（即机器所输出推拿力）以及内置气囊的弯曲程度（即患者膝关节弯曲角度）。图 5 展示了装置的控制流程。图 5 中，$e$ 表示误差；$E$ 表示模糊误差集合；ec 表示误差积分；EC 表示模糊误差积分集合；$u$ 表示控制量。

## 2.3　PSO-BP 推拿预测算法设计

在设计 BP 神经网络时，确定隐藏层节点数和训练函数的设置是 2 个重要环节。研究使用交叉验证来评估不同隐藏节点数的模型性能，并选择了最佳模型。表 1 展示了不同节点层下模型的准确度。PSO 算法用于优化 BP 网络的权重和偏差，以提高训练效率和精度。当进化达到 35 次时，进化曲线收敛，目标函数值不再有大的波动，表明粒子群优化（PSO）算法接近最优解。PSO-BP 模型可在输入患者信息后输出个性化的推拿曲线。图 6 展示了在 50 个实例下 PSO-BP 模型与 BP 模型的预测结果。

在验证集上,PSO-BP 平均预测误差为 5.34 N,可以满足临床需求。

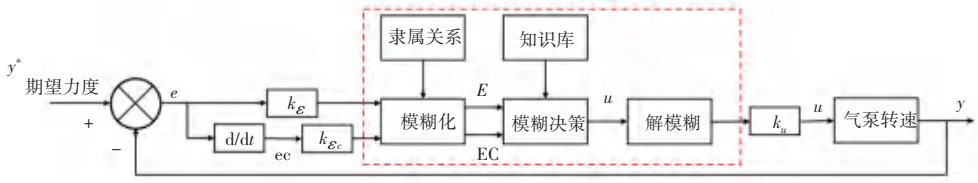
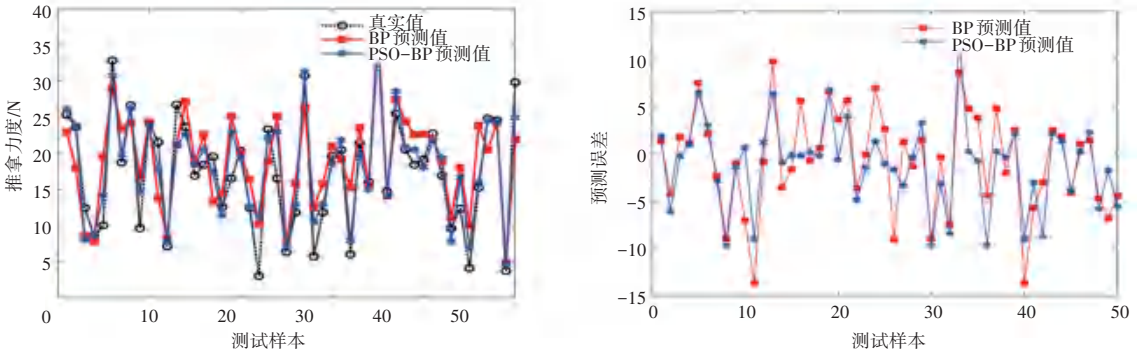



**图 5 推拿操作模糊控制流程**

**Fig. 5 Fuzzy control flow of massage operation**




(a) 预测值和实际值对比 (b) 预测值和实际值的误差

**图 6 预测值与实际值对比**

**Fig. 6 Comparison of prediction values and actual values**

**表 1 不同隐藏节点层下 BP 模型预测精度**

**Table 1 Prediction accuracy of BP model under different hidden node layers**

| 隐藏节点层 | MSE |
|---|---|
| … | … |
| 5 | 0.033 |
| 6 | 0.026 |
| 7 | 0.019 |
| 8 | 0.026 |
| 9 | 0.026 |
| … | … |

## 3 装置可用性验证

决定推拿效果的实际因素可被简化为推拿部位与推拿力度。因此,本研究针对已开发装置的定位能力与输出力误差分别验证。

### 3.1 推拿装置穴位定位验证

穴位定位验证实验分为 2 部分,验证按摩头后端轴向力不会引起前端活动按摩头的过度漂移以及在患者位姿切换时、验证活动按摩头可以跟随膝眼穴位位移。

#### 3.1.1 按摩头偏移误差实验

本研究采用 Micron Tracker 双目视觉系统和数显推拉力计,来评估基于球形关节的按摩头在推拿进程中产生的偏移误差。实验过程中记录按摩头顶端在给力过程中的三维坐标,以获得按摩头在 *xoz* 平面上的位移数据,即为偏移误差。

图 7 展示了按摩头位移随推力变化的曲线图。实验结果显示,按摩头在 *xoz* 平面上存在偏移误差,误差变化范围较小,变化趋势与力度施加存在不一致性(皮尔逊相关系数为 0.172)。进一步的分析表明,按摩头的偏移误差主要集中在 1~3 mm 区间,依照《经穴名称与定位》所述穴位位置作为定位标准,说明该设计所提出的仿生按摩头具有较好的定位精度,可满足临床需求。

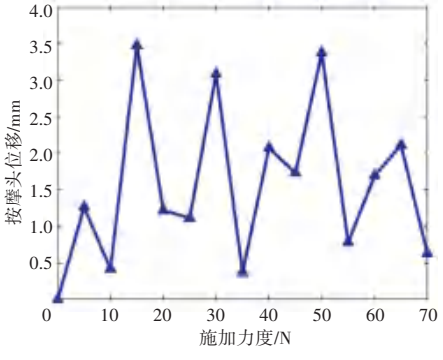



**图 7 漂移误差曲线**

**Fig. 7 Drift error curve**

#### 3.1.2 按摩头定位准确性实验

为消除由于客观因素所导致的测试误差,受试

者将传感器固定于髌骨上方 8 cm 处，实验人员在过程中提醒受试者平稳完成指定动作。将按摩头对准膝眼后，参考患者膝关节角度与医生推拿力的关系曲线，对患者膝关节角度 0°~90°区间内采用标准推拉力计输出对应角度的推拿力，每 10°为一组。每组间，Micron Tracker 双目视觉系统通过识别探针标志点，实时记录按摩球头部顶点的三维坐标与预设膝眼穴。通过对误差数据的分析，研究计算了按摩头在 *xoz* 平面上的位移。

图 8 展示了按摩头位移随推力变化的曲线图。观察误差曲线可得，在位移过程中穴位点距离按摩头顶端的平均欧氏距离为 2.20 mm，最大偏差欧式距离为 3.16 mm。由此可见，当定位内胆有效固定按摩头至穴位处后，当患者位姿变化时，球形结构所包含的活动可以实现对穴位的有效跟踪。

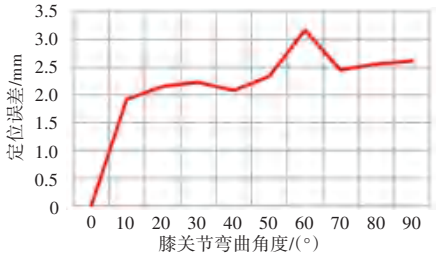



**图 8　定位误差曲线**

**Fig. 8　Positioning error curve**

此外，研究为连续实验。要求受试者佩戴推拿装置完成 3 次坐立切换，共重复 5 次。表 2 展示了 5 次实验所采集的误差数据。由此可以发现，在真实工作场景下，按摩头随膝关节角度变化所导致的误差会出现累计。但依照《经穴名称与定位》所述穴位位置作为定位标准，装置的定位准确性满足临床需求。

**表 2　连续定位准确性测试**

**Table 2　Continuous positioning accuracy tests**　　mm

| 测试轮数 | 第 1 次坐立切换定位误差 | 第 2 次坐立切换定位误差 | 第 3 次坐立切换定位误差 |
|---|---|---|---|
| 1 | 1.32 | 1.69 | 2.08 |
| 2 | 0.85 | 1.36 | 1.70 |
| 3 | 1.22 | 1.57 | 1.89 |
| 4 | 0.93 | 1.48 | 1.77 |
| 5 | 1.04 | 1.19 | 1.58 |

### 3.2　推拿装置输出力学验证

面对同一患者，推拿装置的输出力与推拿医师的输出力之间的差异直接反映了装置的可靠性。研究招募了 2 位退行性膝骨关节炎患者，且不被包含于数据采集实验阶段。2 位患者接受同一医师推拿并通过上述数据采集系统采集推拿过程中所产生的力学数据。间隔一周后，2 位患者使用推拿装置进行推拿治疗。

图 9 展示了医师推拿力曲线与机器所输出的推拿力曲线，2 条曲线波形一致。本研究采用线性度评价观测值与真实值之间的误差度和拟合曲线的吻合程度。经计算，平均相对误差为 11.40%，平均误差为 8.60 N。该装置已经对医师的推拿手法做出部分仿真，力学误差较大的原因可能与所选用的微型泵产生的压力不够稳定有关。换用更为精密的充放气系统后，有望进一步提升推拿装置力学精度。

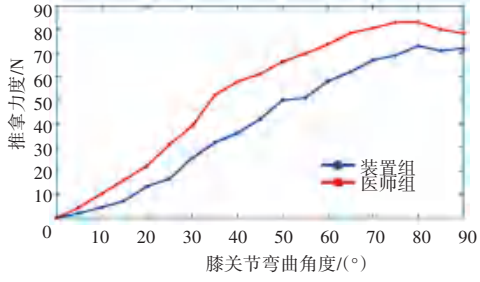



**图 9　推拿装置输出力对比**

**Fig. 9　Comparison of output force of massage device**

## 4　结束语

本研究成功开发了一款基于坐位调膝法的可穿戴式仿生推拿装置。该装置通过结合气囊加压技术和 PSO-BP 预测算法，实现了对患者膝关节的个性化推拿治疗。研究结果表明，该装置在穴位定位和力学输出方面表现出良好的性能，尽管目前的力学输出精度仍有待提高，但已展示出明显的临床应用潜力。

## 参考文献

[1] 任欢. 养老服务人才培养力度加强[N]. 光明日报，2024-10-12(4).

[2] Seinmetz J D, Culbreth G T, Haile L M, et al. Global, regional, and national burden of osteoarthritis, 1990—2020 and projections to 2050: A systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2021[J]. The Lancet Rheumatology, 2023, 5(9): e508-e522.

[3] 张政，谢利民，丁全茂，等. 膝骨关节炎中医推拿治疗技术规范专家共识[J]. 中医杂志，2020，61(16)：1469-1472.

[4] 付阳阳，龚利，姜淑云，等. 坐位调膝法治疗膝骨关节炎即刻疗效的相关因素分析[J]. 中医药导报，2020，26(8)：32-34.

[5] 康知然，龚利，邢华，等. 坐位调膝法治疗膝骨关节炎的治疗理念与原理初探[J]. 上海中医药大学学报，2020，34(4)：98-102.

[6] 梁红广，姜淑云，李建华，等. 坐位调膝法治疗膝骨关节炎的疗效与步态分析研究[J]. 北京中医药，2018，37(2)：135-

138.
[7] 邹荣华, 吴婷, 蔡阁, 等. “五穴四针”联合坐位调膝法治疗膝骨关节炎疗效观察[J]. 浙江中医杂志, 2023, 58(12): 894-895.
[8] 王志超, 盛锋, 王赛娜, 等. 中医住院医师规范化培训推拿手法教学思考[J]. 中国中医药现代远程教育, 2022, 20(23): 11-13.
[9] 王霖, 程红云, 葛湄菲. 精神内守, 病安从来:用《黄帝内经》“治神”理论防治推拿职业病的探讨[J]. 光明中医, 2013, 28(1): 14-15.
[10]马邦峰, 王殊轶, 钟云生, 等. 基于坐位调膝法的仿生推拿装置研究[J]. 智能计算机与应用, 2023, 13(2): 150-154.
[11]邵萌, 潘正中, 孙金伟, 等. 基于 EMD-PSO-BP 模型的短期潮流流速预测[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2024, 54(11): 134-141.
[12]彭治文, 陈晓亮, 朱珈辰, 等. 基于 PSO-BP 神经网络的游泳池式反应堆堆芯功率调节系统优化研究[J]. 核动力工程, 2024, 45(4): 173-180.
[13]李润泽, 王卫兵, 李小军. 基于 PSO-BP 模糊 PID 的变距取苗机构控制系统设计[J]. 农机化研究, 2025, 47(2): 9-18.
[14]邵盛. 推拿手法治疗膝骨关节炎调控“筋骨力平衡”的机制研究[D]. 上海:上海中医药大学, 2020.
[15]邹荣华, 吴婷, 蔡阁, 等. “五穴四针”联合坐位调膝法治疗膝骨关节炎疗效观察[J]. 浙江中医杂志, 2023, 58(12): 894-895.
[16]梁安, 任丽珠, 谢云兴, 等. 坐位调膝法联合本体感觉训练治疗缓解期膝骨关节炎的临床研究[J]. 中国现代医生, 2023, 61(22): 30-33.
[17]吴凯丽, 刘敏, 史丹辉. 腧穴热敏化艾灸结合坐位调膝法治疗膝关节骨性关节炎临床观察[J]. 实用中医药杂志, 2022, 38(1): 106-108.
[18]梁红广, 姜淑云, 李建华, 等. 坐位调膝法治疗膝骨关节炎的疗效与步态分析研究[J]. 北京中医药, 2018, 37(2): 135-138.
[19]谢俊成, 陈洁, 徐刚, 等. 推拿手法数据手套及数据采集系统的研发[J]. 按摩与康复医学, 2022, 13(23): 1-5.
[20]朱政, 唐晓斌, 车美艳, 等. 针刺复式手法“得气”后特征参数采集系统设计与学习评价:以“赤凤迎源”补泻手法为例[J]. 中医教育, 2022, 41(2): 47-51.
[21]宋朋飞, 邢华, 马邦峰, 等. “坐位调膝法”治疗膝骨关节炎数据采集平台建设及手法操作参数初探[J]. 北京中医药, 2023, 42(4): 442-445.
[22]姜桐. 基于用户研究的模块化球形关节人偶设计[D]. 济南: 山东建筑大学, 2024.
[23]杨万虎, 张帆, 倪喜卓. 感应式磁悬浮球形关节的仿真特性分析[J]. 电子技术, 2024, 53(1): 20-21.
[24]任洵涛, 边斌, 王亮. 粒子群算法优化的液压球形关节自抗扰控制研究[J]. 机床与液压, 2022, 50(7): 69-73.
[25]张丽, 李连华, 周晓燕, 等. 气囊仿生助产仪在疤痕子宫经阴道分娩中的应用效果分析[J]. 实用预防医学, 2024, 31(11): 1368-1371.
[26]朱义超, 苏明, 张全意. 不同体质量指数患者行盆腔腹腔镜手术气管导管气囊压力的变化研究[J]. 中国现代医药杂志, 2024, 26(10): 72-75.
[27]李浩宸, 王树森, 姜奇, 等. 先导式二位三通电磁阀的选型和应用[J]. 阀门, 2022(5): 393-396.
[28]何擎谋, 吴心怡, 甘彬婷, 等. 微型气泵的特点与应用[J]. 电子技术, 2022, 51(4): 284-285.