

# 基于人机工程学的便携智能听诊器形态优化设计研究

韩利贤, 袁雷池

武汉工程大学艺术与 design 学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2025年12月13日; 录用日期: 2026年1月13日; 发布日期: 2026年1月22日

## 摘要

手持产品的设计需在形态美学与功能合理性之间取得平衡, 其抓握部分作为关键的人机交互界面, 直接影响用户的舒适体验。本研究旨在探讨手持产品抓握舒适度与产品设计之间的人因约束关系, 以优化产品手感, 提升用户体验。首先, 基于手持产品的设计原则与抓握方式展开人因分析; 其次, 从用户感知特征出发, 结合手部舒适感知分区与上肢关节活动范围, 并利用表面肌电(sEMG)技术分析前臂肌肉在抓握状态下的反应, 获取抓握角度的设计依据; 接着, 从用户行为特征出发, 以智能听诊器为研究对象, 运用SAPAD模型从语构层、经验层、语意层解析抓握行为意义, 并转化为设计要素; 最后, 基于人因约束开展设计实践, 并结合虚拟仿真进行客观评估。本研究通过生理测量与统计分析量化用户抓握的生理与行为反应, 结合定性分析, 为手持产品抓握舒适度的人因优化设计提供新思路, 对提升产品手感体验、增强产品感性价值、降低使用风险具有积极意义。

## 关键词

人机工程学, 智能听诊器, 表面肌电, 肌肉疲劳, 形态优化, 手持医疗器械

# Research on the Morphological Optimization Design of Portable Intelligent Stethoscopes Based on Ergonomics

Lixian Han

School of Art and Design, Wuhan Institute of Technology, Wuhan Hubei

Received: December 13, 2025; accepted: January 13, 2026; published: January 22, 2026

## Abstract

The design of handheld products needs to achieve a balance between aesthetic form and functional rationality, with the grip area serving as a key human-machine interaction interface that directly affects user comfort. This study aims to explore the ergonomic constraints between grip comfort and product design in handheld products, in order to optimize the product's tactile feel and enhance user experience. First, an ergonomic analysis is conducted based on the design principles and grip methods of handheld products; second, starting from user perceptual characteristics and combining hand comfort zones with upper limb joint range of motion, surface electromyography (sEMG) technology is used to analyze the forearm muscles' response during gripping to obtain a design basis for grip angles; next, based on user behavioral characteristics and using an intelligent stethoscope as the research subject, the SAPAD model is applied to analyze the meaning of grip behavior at the syntactic, experiential, and semantic levels, translating it into design elements; finally, design practice is conducted based on ergonomic constraints and objectively evaluated through virtual simulation. This study quantifies users' physiological and behavioral responses during gripping through physiological measurements and statistical analysis, combined with qualitative analysis, providing new ideas for ergonomic optimization of grip comfort in handheld products, which is significant for improving tactile experience, enhancing product emotional value, and reducing usage risks.

## Keywords

Ergonomics, Intelligent Stethoscope, Surface Electromyography, Muscle Fatigue, Morphological Optimization, Handheld Medical Devices

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 研究背景及相关理论

### 1.1. 智能家居生活下的用户需求

近年来,随着互联网与5G技术的普及,智能家居已成为生活常态。然而,作为医疗护理中的基础器械,听诊器的智能化进程相对缓慢,多数仍沿用传统设计,功能单一、使用体验不佳等问题日益凸显。尤其在新冠疫情期间,传统听诊器暴露出穿戴不便、交互不友好等短板[1]。许多突发性健康问题需用户前往医院就诊,其中部分情况并非急症,既造成用户不便,也浪费医疗资源。

因此,开发一款能解决上述痛点、符合用户需求的智能听诊器显得尤为迫切。本研究将针对传统听诊器的功能与体验缺陷,运用人因工程方法,结合表面肌电(sEMG)技术[2],开展智能化造型创新设计,以期提升居家健康管理能力,减轻医疗系统负担。

### 1.2. 听诊器智能化造型创新设计概述

心脑血管疾病发病率持续攀升,对公众健康与社会经济均构成严峻挑战。当前,中国医疗健康产业在政策支持、技术创新、市场需求与全球化战略推动下迎来重要的发展机遇[3],中国医疗健康支出也在逐渐升高,如图1所示。智能听诊器作为医疗设备智能化的重要组成部分,其设计优化不仅关乎产品本身的使用体验[4],更关系到居家医疗的可行性与效率,具有重要的实用价值与社会意义。

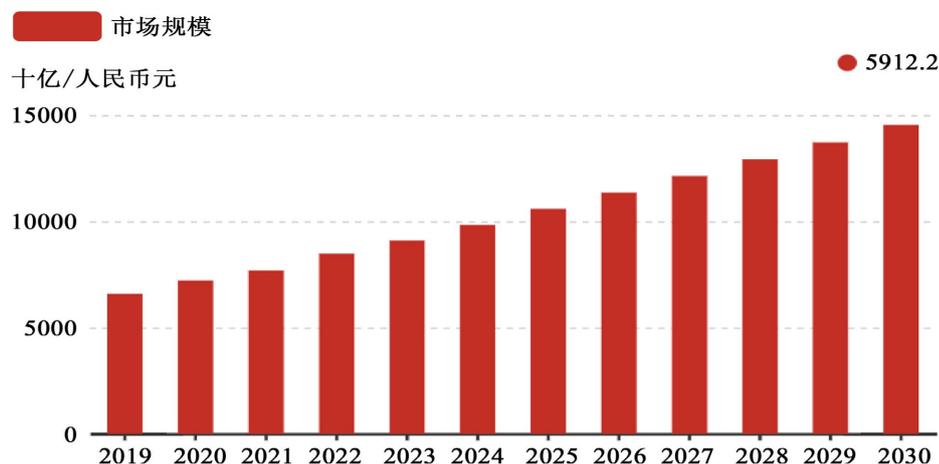


Figure 1. China healthcare expenditure diagram (Source: Toubao Entry)

图 1. 中国医疗健康支出图(来源: 头豹词条)

### 1.3. 研究目的

本研究旨在通过跨学科的研究方法, 实现以下两个核心目标:

1) 构建一套融合主观评价与客观生理测量的产品形态优化研究方法学框架。本研究将突破传统工业设计依赖经验与主观反馈的局限, 系统性地整合表面肌电图(sEMG)客观生理测量技术、用户行为观察以及标准化主观量表[5]。目标是建立一个可复用的、数据驱动的设计研究流程, 即“用户行为洞察 - 生理信号量化分析 - 设计迭代 - 综合验证”, 为手持医疗器械乃至其他高交互频次产品的精细化形态设计提供一套科学、实证的研究范式。

2) 设计并验证一款基于人机工程学原理的便携智能听诊器优化形态。应用上述方法, 本研究的实践目标是针对医生长时间、重复性持握操作的痛点, 进行精准的形态再设计。通过对抓握部截面、操作区曲率、设备重心等关键形态变量的干预与测试[6], 最终产出一款经客观生理数据与主观体验双重验证的优化形态方案, 并提炼出具体的设计准则, 为行业设计实践提供直接参考。

### 1.4. 研究意义

本研究的开展具有理论与应用的双重价值:

**理论意义:** 为医疗器械的精细化设计提供实证研究范例。当前, 医疗产品设计研究正从功能性满足向体验性与健康性深度拓展。本研究通过引入 sEMG 这一客观量化工具, 将设计评价从“感觉如何”推进到“肌肉反应如何”的层面, 丰富了人机工程学在设计学中的应用深度。其成果可作为设计学、生物力学与预防医学交叉研究的一个典型案例[7], 推动产品设计研究方法的科学化与精细化。

**实践意义:**

**提升产品舒适度与使用效率:** 优化的形态能够直接减少医生操作中的不适感与肌肉负担, 使医生更专注于诊断本身[8], 从而可能提升检查的稳定性和工作效率。

**降低职业性肌肉骨骼疾病(MSDs)风险:** 重复性劳损是医生的常见职业健康问题。通过源头性的产品形态优化, 本研究致力于减轻因工具设计不当引发的慢性肌肉负荷, 对保障医护人员的职业健康具有积极的预防性价值。

**指导行业设计创新:** 研究成果将为智能听诊器及其他手持医疗设备(如超声探头、注射泵等)的设计研发提供经过科学验证的数据支持和明确的设计指南, 推动行业从“经验设计”向“循证设计”演进。

## 1.5. 持握测量分析技术概述

持握测量分析技术是在力学、解剖学、人机工程学等相关知识基础上, 利用计算机、生物机电等新兴技术, 较精确地测量人体持握时相关部位的运动及受力情况, 并对持握运动参数进行量化分析的设计研究方法[9]。持握测量分析方法主要采用实验分析法, 借助仪器进行理性、定量分析, 所使用的仪器主要包括尺、握力计、表面肌电仪、抓握运动应力分析仪等工具与设备。

**表面肌电测试系统:** 它是一套通过测量肌肉在运动时产生的电信号来描述肌肉施力情况的工具, 可以用于量化分析不同肌肉或者肌肉群在运动时所产生的活动情况、施力的时间以及施力的大小等[10]。它主要由直接收集肌肉电信号变化的电极片、接受电极片信号的信号采集器、分析与优化原始肌电信号的信号处理器以及将最终的信号输出到电脑的信号输出器四个硬件部分以及相配套的软件组成[11]。

**表面肌电信号(sEMG):** 由表层肌肉通过收缩使其运动单元的动作电位与皮肤表面神经干的电活动在皮肤表面进行时空叠加而同时产生的效应, 能不同程度地反映运动神经和肌肉活动水平及功能[12], 且由于其具有无创性、时效性、精确性和易操作性等优势, 因此常用于检测肌肉组织的电生理活动变化, 并且可以进一步分析提取相关特征值, 以确定是否发生了肌肉疲劳。本实验主要包含原始表面肌电信号的采集和处理后的数据分析, 目的是研究表面肌电信号特征与上肢肌肉结构和肌肉活动状态以及抓握功能状态之间的关联性, 寻找分析其肌肉信号变化的可能原因, 继而广泛应用于肌肉工作的人因工效学分析、操作姿势分析、康复状态功能评价、肌肉疲劳识别以及肌电假肢控制与动作模式研究等众多研究领域。目前基于表面肌电信号的生理测量已经成为人因工效学领域的主要技术手段之一, 其中数据分析主要分为时域指标分析和频域指标分析两个方面。

### 1) 时域分析

**时域分析:** 一般将肌电信号作为时间的函数, 即以时间为自变量进行相关统计分析, 不涉及任何非时间的自变量, 能够在时间维度上评价肌电曲线的变化特征, 主要指标包括肌电积分值(IEMG)、平均肌电值(AEMG)、均方根值(RMS)及协同收缩率等。

### 2) 频域分析

**频域分析:** 对生物实时信号的频率特性分析, 也称为功率谱分析。一般是将时域信号通过快速傅里叶转换(FFT)得出, 主要反映肌电信号在不同频率范围内的强度, 得到肌电信号在有关频率特征的信息。指标则包括平均功率频率(MPF)、中位频率(MF) [13]。在研究应用中, 前者常应用于反映局部肌肉运动单位动员或募集程度, 主要用于肌肉收缩程度与特征的情况评判, 而后者 MPF 和 MF 则通过肌肉疲劳状态监测来反映局部肌肉疲劳的程度。

## 2. 实验设计与过程

### 2.1. 实验设计

本研究采用单因素实验设计, 旨在探究不同持握方式对使用者疲劳程度的影响。实验招募 20 名身体健康、右利手的参与者, 自变量为听诊器的三种不同持握方式, 如图 2 所示(对应产品 A、B、C), 因变量为通过 ErgoLBA 平台采集的生理数据, 用于评估产品的可读性与易用性。实验采用 ErgoLBA 人机环境同步平台 V3.0, 同步采集行为与生理数据。

#### 1) 被试信息与人体测量

共招募 20 名健康、右利手成人被试(男女各半), 年龄 22~35 岁(均值  $28.4 \pm 3.2$  岁)。关键人体测量数据包括: 手长(均值  $183.2 \pm 10.5$  mm)、手宽(均值  $84.6 \pm 6.3$  mm)、握围(均值  $510.2 \pm 25.8$  mm)。这些参数可能影响抓握姿势与肌肉负荷, 因此在数据分析中作为协变量进行控制。

## 2) sEMG 信号采集设置

测量肌肉: 桡侧腕屈肌(FCR)、尺侧腕屈肌(FCU)、指浅屈肌(FDS)、拇长屈肌(FPL)。

电极放置: 遵循 SENIAM 标准, 电极间距 20 mm, 置于肌腹最隆起处, 参考电极置于尺骨鹰嘴[14]。

信号处理: 原始信号经 10~500 Hz 带通滤波, 采用汉宁窗(窗长 250 ms, 重叠 50%), 提取均方根(RMS)值, 并以最大自主收缩(MVC)的百分比进行标准化。

本研究选取三款智能听诊器抓握模型(A、B、C)作为实验对象, 其关键形态特征量化对比如下表 1 所示。

Table 1. Model data

表 1. 模型数据

特征参数	模型 A	模型 B	模型 C
抓握截面形状	类椭圆	矩形圆角	圆形
截面长轴(mm)	35	38	32
截面短轴(mm)	25	30	32
曲率半径(mm)	12	8	15
重心位置(距抓握端 mm)	45	50	40
材质表面摩擦系数	0.6	0.5	0.7



Figure 2. Experimental test model

图 2. 实验测试模型

## 2.2. 实验流程与数据采集

一般情况下, 采集到的肌电信号主要有效频带分布在 20 Hz 至 500 Hz 之间, 主要能量集中在 50 Hz 至 150 Hz 之间[15], 因此极其微弱且容易受到环境干扰, 为确保获得稳定准确的肌电信号数据, 对于电极的采集位置选取非常重要。本研究主要是针对用户抓握舒适度的研究, 因此集中考虑使用手持产品时参与活动的上肢肌肉群。最终, 通过查阅分析大量的资料初步选定前臂肘周边的肱桡肌进行本次肌电

信号采集位置, 在实验开始前确保室内测试环境温度的适宜, 设置好生理采集参数后对每名被试人员使用 75% 的医用酒精湿巾对整个前臂皮肤表面进行深度清洁并打磨擦拭, 以充分减少阻抗等外界干扰因素。待皮肤自然干燥后目标位置快速贴放一次性电极片。然后, 需将工作电极沿着被试人员右侧胳膊肱桡肌的肌腹(肌肉凸起的部位)贴放, 被测者分别使用产品 C、产品 B、产品 A, 依次放置在左肺上叶、右肺上叶、左肺下叶, 每个点位呼吸两个呼吸周期, 每个产品中间休息 10 秒钟再次使用下一个产品进行测试; 最终测量结果如图 3、图 4 所示。

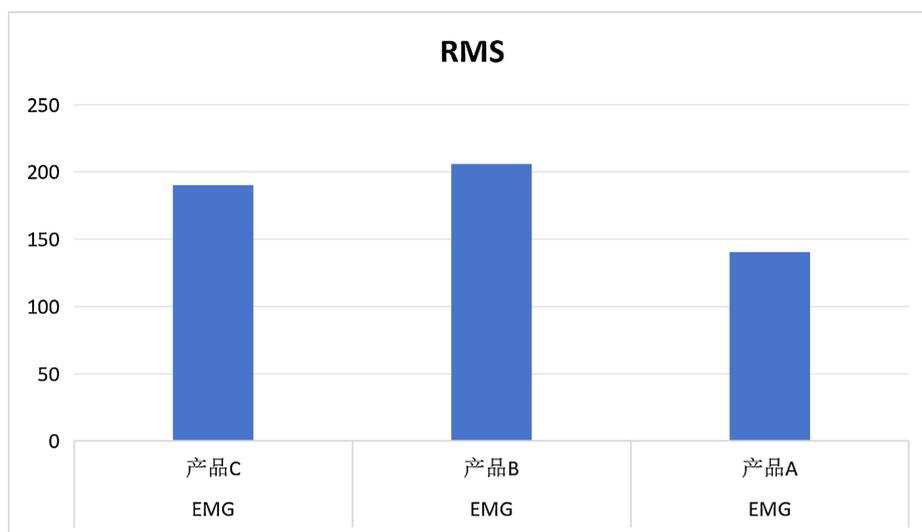


Figure 3. RMS values

图 3. RMS 数值

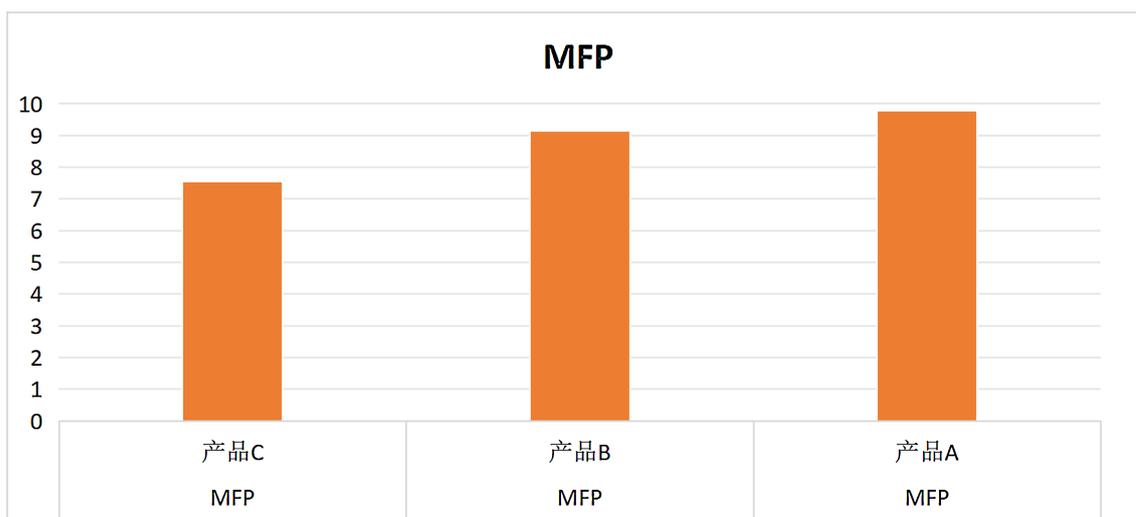


Figure 4. MFP values

图 4. MFP 数值

### 3. 研究分析与讨论

#### 3.1. 数据处理与分析

采集的肌电信号经过滤波和标准化处理后, 提取 RMS 和 MPF 作为核心分析指标。RMS 反映肌肉激

活水平, MPF 反映肌肉疲劳状态。通过对比三种产品在两项指标上的差异, 评估形态设计对肌肉负荷的影响。

### 3.2. 结果分析

#### RMS 结果分析

操作产品 B 时 RMS 值最高, 产品 A 最低。RMS 值随肌肉激活程度增加而上升, 表明产品 B 可能导致更高的肌肉负荷, 更容易引发疲劳。

RMS 的大小决定于表面肌电振幅的高低, 可通过比较不同时期的 RMS, 确定疲劳发生的时间和程度。一般而言, 无论是静力性还是动力性运动, 从初始态到疲劳态的过程中, 表面肌电信号的振幅均会增加, 即随着疲劳的增加, RMS 增大。

#### MPF 结果分析

平均功率频率(MPF): 指该段时间内频率的平均值。在肌肉疲劳状态下, 表面肌电频域指标 MPF 呈递减变化。

肌电信号同步分析, 手臂肌电均方根 RMS 变化较明显, 参与者操作产品 B 时, 肌电 RMS 较大, 操作产品 A 时, 肌电 RMS 较小。参与者操作产品 C 时, MFP 较小, 参与者操作产品 A 时, MFP 较大。

### 4. 结论与展望

实验研究表明, 听诊器的形态设计显著影响持握操作中的肌肉负荷与疲劳发展。产品 A 在 RMS 与 MPF 两项指标上均表现最佳, 说明其形态能有效降低肌肉激活需求、延缓疲劳进程。这可能得益于其抓握截面形状、操作区曲率与重心分布的合理设计, 使得持握时肌肉协调更自然、负荷更均衡。模型 A 的类椭圆截面与适中曲率更贴合自然握姿, 使手指分布均匀、压力分散; 重心位置靠近抓握端, 减少了腕部扭矩, 从而降低桡侧与尺侧腕屈肌的持续激活。此外, 其表面摩擦系数适中, 提供稳定抓握的同时, 避免过度握紧, 进一步减轻指屈肌群负荷。本研究通过 sEMG 客观测量与主观评价相结合的方法, 系统分析了不同听诊器形态对持握肌肉疲劳的影响, 并验证了产品 A 在降低肌肉负荷方面的优越性。未来工作可进一步拓展至更多肌肉群(如手部固有肌)、更长时间的操作模拟, 以及结合压力分布测量等多模态数据, 形成更全面的持握舒适性评价体系。此外, 本研究方法亦可推广至其他高频交互手持设备的设计优化中, 具有广泛的工程应用价值。

### 参考文献

- [1] 乔璐. 特征量化下的手持产品抓握舒适度人因设计研究[D]: [硕士学位论文]. 秦皇岛: 燕山大学, 2024.
- [2] 张海波, 郭应强, 刘立明, 等. 心脏瓣膜手术的百年坚持与探索——2023 亚洲心脏瓣膜中国论坛纪要[J]. 中国胸心血管外科临床杂志, 2024, 31(1): 184-185.
- [3] 李顺昌, 苏余生. 心电与心音信号在运动性心肌顿抑评定中的应用研究[C]/中国生理学会. 中国生理学会第 24 届全国会员代表大会暨生理学学术大会论文汇编. 2014: 390-391.
- [4] 冯智秀, 靳文奎. 融合 Kano 和感性工学的居家助行器设计方法[J]. 家具, 2025, 46(5): 66-70.
- [5] 刘佳琦. 基于 MEMS 技术的电子听诊器设计及优化[D]: [硕士学位论文]. 太原: 中北大学, 2024.
- [6] Wang, Y., Zhou, M., Wang, Z., Cai, W., Sun, X. and Zhu, H. (2026) Automated Emotional Design Generation for NEV Wheel Hubs: Integrating StyleGAN2-Ada and WOA-SVR within Kansei Engineering. *Expert Systems with Applications*, 298, Article ID: 129927. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2025.129927>
- [7] 林露青. 基于感性工学——FBS 模型的上肢义肢产品设计研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 广东工业大学, 2025.
- [8] Yamamoto, K. (1986) *Kansei Engineering—The Art of Automotive Development at Mazda*. The University of Michigan.
- [9] Norman, D. 情感化设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.

- 
- [10] 高子然, 李智萍, 蒋若楠, 等. 儿童多功能性无线听诊器的研制[J]. 妇儿健康导刊, 2024, 3(16): 17-20.
- [11] 贾羽佳. 基于人因工效学的单手手持探测仪器设计研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2021.
- [12] 王雁, 刘苏. 手持产品的人体工学设计[J]. 人类工效学, 2011, 17(2): 52-55.
- [13] Harih, G. and Dolšak, B. (2013) Tool-Handle Design Based on a Digital Human Hand Model. *International Journal of Industrial Ergonomics*, **43**, 288-295. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2013.05.002>
- [14] Dianat, I., Nedaci, M. and Mostashar Nezami, M.A. (2015) The Effects of Tool Handle Shape on Hand Performance, Usability and Discomfort Using Masons' Trowels. *International Journal of Industrial Ergonomics*, **45**, 13-20. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2014.10.006>
- [15] 张祖耀, 朱媛, 夏芒. 手持产品人机舒适度创新实验设计[J]. 实验技术与管理, 2012, 29(11): 78-81.