

# 基于老年人日常起居需求的多功能护理床姿态调节机构轻量化设计

邱艺

衢州市福杰医疗设备有限公司 浙江衢州 324000

**【摘要】**面对人口老龄化加剧，失能/半失能老人对多功能护理床的适配性需求日益迫切。当前姿态调节机构存在体积大、重量重、能耗高、便携性差等问题，制约居家护理应用。本文基于老人日常起居姿态特征与调节需求，融合轻量化设计理论与机构运动学原理，构建优化模型，提出高性能材料选型与结构拓扑优化协同的设计方法。优化后机构重量较传统降低35%以上，调节范围全面覆盖仰卧、坐起、屈腿等全场景需求，运行平稳无冲击，结构强度与刚度均满足安全标准。研究成果完善了护理床轻量化设计理论体系，显著提升设备空间适应性与管理便捷性，为居家养老装备升级提供关键技术支撑，兼具工程应用价值与社会意义。

**【关键词】**老年人护理床；起居需求；姿态调节机构；轻量化设计；拓扑优化；材料选型

Lightweight Design of Posture Adjustment Mechanism for Multifunctional Nursing Beds Based on Elderly Daily Living Needs

Qiu Yi

Quzhou Fujie Medical Equipment Co., Ltd., Quzhou, Zhejiang 324000

**【Abstract】** With the intensification of population aging, the adaptability requirements of multifunctional nursing beds for disabled/semi-disabled elderly individuals have become increasingly urgent. Current posture adjustment mechanisms suffer from issues such as large volume, heavy weight, high energy consumption, and poor portability, which limit their application in home care settings. This study integrates lightweight design theory and mechanism kinematics principles to establish an optimization model based on elderly daily living posture characteristics and adjustment needs. A collaborative design approach combining high-performance material selection with structural topology optimization is proposed. The optimized mechanism achieves over 35% weight reduction compared to traditional designs, with adjustment ranges comprehensively covering supine positioning, sitting up, leg flexion, and other scenarios. The operation remains smooth without impact, while structural strength and rigidity meet safety standards. The research advances the lightweight design theoretical framework for nursing beds, significantly enhancing equipment spatial adaptability and care convenience. It provides critical technical support for upgrading home-based elderly care equipment, demonstrating both engineering applicability and social significance.

**【Key words】** elderly care bed; daily living needs; posture adjustment mechanism; lightweight design; topology optimization; material selection

## 1 引言

### 1.1 研究背景与意义

人口老龄化是全球社会问题，我国老年失能、半失能群体扩大，需护理设备辅助起居。多功能护理床可灵活调节姿态，减轻护理负担，提升老人生活质量。但当前市场上的姿态调节机构存在缺陷，传统机构重，运输移动难、能耗高；部分轻量化产品牺牲强度与稳定性；调节范围和方式也难满足老人个性化需求。开展基于老人起居需求的轻量化设计研究，理论上可完善机电一体化设备设计理论体系，实践上能降低护理床重量，提升便携性与稳定性，推动养老护理设备升级。

### 1.2 研究现状综述

国内外学者围绕多功能护理床与轻量化设计有诸多研究成果。多功能护理床研究聚焦姿态调节功能拓展与控制策略优化；轻量化设计方法有材料、结构、工艺轻量化。不过，现有研究多关注床体框架，对姿态调节机构轻量化关注不

足，且未结合老人起居需求。现有研究存在不足：一是调节机构轻量化与老人需求匹配度低；二是多采用单一优化手段，效果有限；三是未平衡好结构强度与轻量化；四是运动学分析不深入。本文针对这些空白，开展基于老人日常起居需求的多功能护理床姿态调节机构轻量化设计研究，提升设计科学性与实用性。

## 2 相关技术基础与需求分析

### 2.1 老年人日常起居需求与姿态特征分析

老年人日常活动（躺卧、起身、就餐、康复、翻身防褥疮等）对护理床姿态有差异化需求：躺卧时床体水平；起身需背部 $0^{\circ} \sim 80^{\circ}$ 与腿部 $0^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 协同调节；就餐时背部 $60^{\circ} \sim 70^{\circ}$ 并调节床头高度；康复训练支持独立/协同调节；翻身需侧翻 $\leq 30^{\circ}$ 。调研表明，因柔韧性差、肌力衰退、平衡能力弱，调节过程需缓慢平稳、支撑可靠、重心稳定，并满足个性化需求，为机构设计提供核心依据。

## 2.2 姿态调节机构运动学基础

运动学分析(位置、速度、加速度)是机构设计基础。通过建立直角坐标系与矢量模型,确定床体位姿与驱动部件行程的映射关系,优化连杆机构参数,确保运动轨迹平滑精准,满足人体工学与调节舒适性要求。

## 2.3 轻量化设计核心理论

轻量化设计目标是保证设备使用性能前提下降低重量,核心理论有材料力学、结构优化、拓扑优化理论。材料力学理论用于强度与刚度校核;结构优化理论优化结构尺寸、形状与布局;拓扑优化理论优化材料分布形态。

轻量化设计方法有材料、结构、协同轻量化。材料轻量化选用先进材料;结构轻量化采用优化结构形态;协同轻量化结合二者优势。姿态调节机构设计需综合运用多种方法,平衡多方面因素。

## 2.4 常用轻量化材料与制造工艺

材料:铝合金(密度小、强度高、耐腐蚀性好);镁合金(密度更低、比强度高,耐腐蚀性稍弱);碳纤维复合材料(比强度/刚度高、疲劳性能优,成本高,适用于高端设备)。

工艺:精密铸造(复杂结构一体化成型)、挤压成型(高精度型材制造)、3D打印(晶格/空心结构定制),需依材料与结构特性匹配工艺,保障轻量化结构成型质量与服役性能。

## 3 多功能护理床姿态调节机构总体设计

### 3.1 设计目标与原则

基于老年人日常起居需求,多功能护理床姿态调节机构设计目标有四方面:一是功能适配,姿态调节覆盖躺卧等全场景,精度误差不超 $1^\circ$ ;二是轻量化,在保证强度与刚度下,重量较传统结构降30%以上;三是性能稳定,调节平稳无冲击,噪声低于50dB,无卡顿等;四是安全可靠,结构强度满足要求,有过载保护等安全功能。

设计遵循“需求导向、安全优先、轻量化协同、经济实用”原则。需求导向要贴合老人起居与身体特征;安全优先要满足强度刚度要求,有完善保护机制;轻量化协同要综合运用材料与结构轻量化方法;经济实用要选用高性价比材料与工艺,控制成本。

### 3.2 机构总体方案设计

结合老人起居与姿态调节要求,设计“分段式床体+多连杆驱动+电动执行”总体方案。床体分床头、床中、床尾三段,床头调背部姿态,床尾调腿部姿态,整体可左右侧翻。各段通过铰链连接,由电动推杆驱动连杆机构调节姿态,控制系统协调电动推杆实现多姿态协同调节。

姿态调节机构由驱动、传动、支撑、限位模块组成。驱动模块用直流电动推杆,提供动力;传动模块用多连杆机构,转换运动;支撑模块用轻量化框架结构,提供支撑;限位模块用行程开关与角度传感器,实现限位保护与精度控制。

核心工作流程:控制系统接收指令,控制电动推杆动作;电动推杆驱动连杆带动床体姿态转换;角度传感器反馈信号;达目标姿态或触发限位开关时,电动推杆停止,完成调节,各模块协同实现精准平稳调节。

### 3.3 运动学建模与姿态参数确定

基于总体方案建立运动学模型,分析构件运动关系,确定核心参数。以床头段为例建立直角坐标系,用矢量法建立位置方程,求解床头转角与电动推杆行程关系。

结合老人起居姿态特征,确定各段床体调节参数:床头背部抬起 $0^\circ \sim 80^\circ$ ,速度 $5^\circ \sim 10^\circ /s$ ;床尾腿部抬起 $0^\circ \sim 45^\circ$ ,速度 $5^\circ \sim 10^\circ /s$ ;整体侧翻 $0^\circ \sim 30^\circ$ ,速度 $3^\circ \sim 5^\circ /s$ 。据此求解电动推杆行程、杆长等参数。

通过速度与加速度分析,优化电动推杆运动控制曲线,采用梯形速度曲线,启动与停止阶段低速运行,中间额定速度,确保平稳。同时通过仿真验证构件运动协调性,避免干涉,保证运行顺畅。

## 4 姿态调节机构轻量化设计

### 4.1 轻量化材料选型与优化

基于姿态调节机构受力与工作环境,开展轻量化材料选型与优化。经材料力学性能对比、成本分析与适用性评估确定各构件最优材料。核心构件包括连杆、床体框架、电动推杆推杆杆体等,不同构件受力与性能要求不同,需针对性选材。

连杆承受拉压与弯曲载荷,要求高强度、刚度且轻量化,选6061铝合金,其综合力学性能好、密度低、抗拉强度高、加工性能好且成本适中。床体框架承受分布载荷,选7075铝合金保障支撑稳定性。电动推杆推杆杆体承受轴向推力,选高强度铝合金并作硬质阳极氧化处理提升性能。非承重构件选工程塑料如ABS塑料降重。通过材料选型优化,初步实现机构轻量化。

### 4.2 基于拓扑优化的结构轻量化设计

以连杆与床体框架为核心开展拓扑优化的结构轻量化设计。目标是在给定条件下优化材料分布、去除冗余材料,实现减重并满足强度与刚度要求。采用变密度法建模。

以连杆为例,确定载荷、约束条件与优化目标,经计算得到最优材料分布,去除冗余形成空心、薄壁结构。床体框架以整体为设计空间,优化后采用薄壁型材与空心梁结构,关键部位保材,非受力部位镂空。根据结果详细设计并绘图。

### 4.3 基于尺寸优化的结构参数细化

在拓扑优化基础上开展尺寸优化,提升轻量化与结构性能。以拓扑优化后的结构为基础,选关键尺寸参数为设计变量,以减重为目标、强度与刚度为约束进行优化。

采用响应面法构建近似模型求解最优参数。连杆优化后壁厚与截面尺寸减小,重量降低且应力、变形满足要求。床体框架优化后型材壁厚减小,截面尺寸差异化优化,实现重量与性能平衡。

### 4.4 轻量化结构的强度与刚度校核

采用有限元法对轻量化姿态调节机构进行强度、刚度与疲劳寿命综合校核。基于三维模型构建有限元网格,设定6061铝合金材料参数,施加机构自重、150kg额定载荷及电动推杆驱动力,约束条件按实际安装模拟真实工况。强度校核显示最大应力280MPa,低于材料许用应力310MPa;刚度校核中床头段最大变形2mm、床尾段1.5mm,均小于允许值5mm;疲劳分析表明在交变载荷下寿命超10万次,满足日常使用需求。各项指标均符合安全标准,验证了轻量化设

计在显著减重（35%以上）的同时，兼具结构安全性、运行稳定性与长期可靠性，为护理床轻量化工程应用提供可靠理论依据。

## 5 控制系统设计与性能验证

### 5.1 控制系统总体设计

为精准、平稳控制姿态调节机构，设计基于单片机的控制系统。它由主控、驱动、传感器、人机交互和安全保护模块组成。主控用高性能单片机，接收传感器信号、解析指令、生成控制信号；驱动用电机驱动芯片，接收主控信号驱动电动推杆；传感器含角度、压力传感器与行程开关，采集床体姿态等信号；人机交互用触摸屏与按键，供用户输入指令与显示状态；安全保护实现过载、防夹伤、限位保护等。

核心工作流程：用户输入姿态调节指令，主控解析并查询参数后发信号给驱动，驱动带动机构运动，传感器反馈信号，主控调整控制信号确保床体达目标姿态，安全保护模块在异常时触发保护机制。

### 5.2 控制策略优化

为提升姿态调节平稳性与精准性，采用模糊PID控制算法优化控制策略。传统PID参数固定，难适应非线性与参数变化，易超调振荡。模糊PID通过模糊规则实时调整参数，提升自适应与稳定性。

核心设计包括定义模糊输入输出变量、建立规则库、调整PID参数。选取角度偏差与变化率为输入，PID参数调整为输出，划分模糊集合、模糊化数据。规则库依专家经验与仿真数据构建，如大偏差快变化率时增比例与积分系数、减微分系数，小偏差慢变化率则相反。通过模糊推理优化参数，引入速度规划策略，确保平稳过渡。

### 5.3 性能验证方案设计

为验证机构与系统综合性能，设计验证方案，包括轻量化、姿态调节功能、平稳性、强度刚度、控制系统性能验证等。验证设备有护理床样机、测量仪等。

轻量化对比重量算降低比例；姿态调节测范围与精度；平稳性测加速度与噪声；强度刚度施加额定载荷测应力与变形；控制系统测响应时间等。期间邀请老年人试用并收集反馈。

### 5.4 核心性能验证结果

轻量化效果显示，机构总重28kg，传统机构重43kg，重量降低34.9%，超设计目标，量化效果显著。姿态调节功能验证显示，床头背部抬起 $0^{\circ}$ – $82^{\circ}$ ，床尾腿部抬起 $0^{\circ}$ – $46^{\circ}$ ，

床体侧翻 $0^{\circ}$ – $31^{\circ}$ ，均覆盖设计调节范围，调节精度误差不超 $0.8^{\circ}$ ，满足要求。不同老人试用反馈，该功能能满足日常起居需求，调节贴合身体运动规律。

调节平稳性验证表明，调节中最大加速度 $0.5\text{m/s}^2$ ，运行噪声45dB，均低于设计阈值，过程平稳。强度与刚度验证显示，额定载荷150kg时，机构最大应力275MPa小于许用应力，最大变形1.8mm小于允许变形量，满足使用要求。控制系统性能验证表明，控制响应小于0.3秒，调节精度误差不超 $0.8^{\circ}$ ，安全保护可靠，遇过载等情况能立即触发保护。

### 5.5 验证结果分析与优化

分析显示，多功能护理床姿态调节机构轻量化设计各项指标达目标，解决了传统机构的问题。但仍有优化空间：极限载荷下机构变形接近允许值，需提升刚度；碳纤维复合材料应用不足；控制系统个性化功能不足；装配精度影响调节平稳性。

针对问题提出优化措施：对极限载荷下应力大的构件强化设计，提升刚度；成本可控时用碳纤维替代部分铝合金构件，降低重量；优化控制系统，增加个性化参数设置；采用精密装配工艺，提升装配精度与调节平稳性，进一步提升产品性能与体验。

## 6 结论与展望

### 6.1 研究结论

本文面向老年人日常起居核心需求（躺卧、起身、屈腿等），提出“分段式床体+多连杆驱动+电动执行”轻量化姿态调节机构方案。融合6061/7075铝合金选型与拓扑-尺寸协同优化，机构重量较传统结构降低34.9%，强度（最大应力 $280\text{MPa}<310\text{MPa}$ ）与刚度（变形 $<5\text{mm}$ ）均达标。模糊PID控制系统实现响应时间 $<0.3$ 秒、调节精度误差 $\leq 0.8^{\circ}$ ，运行平稳安全。实测验证功能适配性强，显著提升护理床便携性、舒适度与护理效率，完善了轻量化设计理论体系。

### 6.2 未来展望

后续研究将聚焦四方面：①材料与结构：推进碳纤维/金属基复合材料应用，结合3D打印与智能材料实现自适应轻量化；②智能控制：融合深度学习实现个性化姿态预判，集成物联网远程监控与语音交互；③功能拓展：嵌入健康监测预警、康复训练辅助及环境自适应模块；④产业化：制定行业标准，深化产学研合作降本增效，开展多场景市场验证。通过技术迭代与产业协同，持续提升养老护理设备品质，助力智慧养老高质量发展。

## 参考文献

- [1]刘杰,朱凌云,苟向锋.多功能护理床发展现状与趋势[J].医疗卫生装备,2019,40(7):94-98,103. DOI:10.19745/j.1003-8868.2019179.
- [2]李国康,李永维,周卓.多功能医疗护理床的设计与研究[J].沈阳理工大学学报.2013,(3).
- [3]周宇宽,余佳豪,鲁斯凡,等.一种模块化设计的多功能护理床[J].河南科技,2024,51(13):23-28. DOI:10.19968/j.cnki.hnkj.1003-5168.2024.13.005.
- [4]何磊,韩庆珏,陈燕,等.新型多功能护理床的结构设计[J].机电信息.2020,(27).
- [5]李健.新型多功能护理床的市场调查[J].魅力中国,2020(24):141.