

海洋钻井平台作业腰部外骨骼助力系统设计

机械2101班：杨卓俊 指导教师：李万钟 论文类型：毕业设计

摘要：本文应用人体腰髋部解剖学分析、搬抬动作生物力学建模、模块化系统设计、材料优化及智能控制集成等研究方法，探讨了海洋钻井平台高负荷作业下腰背部肌肉骨骼损伤问题及腰部助力外骨骼系统的设计。首先，通过解剖学分析揭示腰椎前倾力矩可达143Nm、67%海洋工程职业伤害与肌肉骨骼劳损相关的关键问题，并建立搬抬动作生物力学模型；其次，基于“柔性机械系统+智能控制系统”架构，采用316L不锈钢与碳纤维复合材料解决海洋环境腐蚀问题，选用MG8008电机配合绳索传动提供助力，构建硬件支撑体系；最后，集成霍尔式角度传感器与压阻式压力传感器实现PID闭环控制，通过生物力学分析验证该外骨骼可使腰部肌肉负荷降低40%-60%，下蹲搬抬时L5/S1椎间盘力矩减少22%，得出该系统可有效缓解腰椎压力的结论，并提出基于海洋环境适应性的驱动布局优化、材料防腐工艺改进及人机协同控制策略等对策建议。

关键词：海洋钻井平台；腰部助力外骨骼；生物力学分析；智能控制；人机协同

1 研究背景与技术现状

海洋钻井平台作业具有高风险、高强度特点，从作业环境来看，海洋钻井平台有着振动、噪音、高低温等复杂情况，这使人工操作变得更难，有些地方虽然用上了起重机、机械臂之类的自动化设备，但像精细装配、应急处理、狭小空间作业这些场景里，人工操作还是不能被取代，钻井设备现场调试，小件物件搬运这些任务，都需要操作人员不断做高强度动作，现有的辅助工具没法做到动态、准确地帮忙，导致腰背部肌肉骨骼损伤风险显著，亟需设计专用腰部外骨骼系统以改善作业安全性与效率，而已有的研究大多集中于物流、制造业这些方面，针对海洋钻井平台这类特殊的外骨骼系统设计仍然处在空白状态，怎样把外骨骼的助力效果和海洋作业的极端环境相适应，这是当下亟待攻破的技术难题。

2 发展现状

2.1 国外研究现状

国外腰部助力外骨骼研究已较为丰富：Cyberdyne的HAL-5外骨骼含髋、膝2个自由度，电机驱动并通过肌电传感器实现助力；Atoun的MODEL Y电动外骨骼采用碳纤维材质，重4.5Kg，髋关节双侧电机可辅助搬运；范德比尔特大学的HeroWear Apex为轻量化被动设备，柔性织物材质可灵活控制助力；德国Ottobock的Paexo back被动外骨骼能随手臂抬升角度调整支撑力矩；荷兰Laevo外骨骼则通过柔性梁和弹性

结构支撑腰椎。

2.2 国内研究现状

国内腰部助力外骨骼研究起步较晚但发展迅速：上海傲鲨智能研发的外骨骼具备多种助力模式及灵敏度调节功能；北京铁甲钢拳的电驱版外骨骼轻量且助力强劲，内置传感器可智能辅助；迈宝智能的飞燕系列借助算法为康复等场景提供腰部支撑。国内在功能多样化与智能化上有进展，但特殊环境适应性待突破。

3 研究内容与方法

3.1 总体设计方案

本研究设计了模块化集成架构，该架构由柔性机械系统、智能控制系统共同组成协同体系。研究运用生物力学分析与多学科优化驱动设计方法，先是依据人体腰髋部解剖学特征构建生物力学模型，具体模型如图2.1所示，针对柔性机械系统，作为外骨骼的硬件基础，柔性机械系统不仅构建了整体框架结构，更承载着控制系统的安装与运行功能，为整个外骨骼的稳定工作提供硬件支撑。其中，腰部连接组件扮演着基座的角色，通过高强度结构设计，将驱动组件、髋部执行组件等关键模块稳固连接，确保在平台持续晃动的工况下，各部件始终保持精准的相对位置关系，成为外骨骼稳定运行的结构根基。

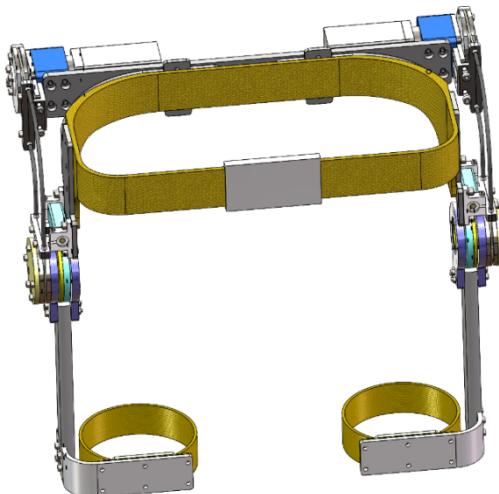


图3.1 腰部外骨骼总体设计

位于腰部连接组件后部的驱动组件，如图2.2，作为动力输出核心，采用高扭矩电机与精密传动机构的组合设计。在应对平台重物搬、设备安装等重载任务时，能够根据作业负载动态调整输出功率，犹如稳定的“动力心脏”，持续提供平顺且强劲的动力输出，满足复杂工况下的动力需求。

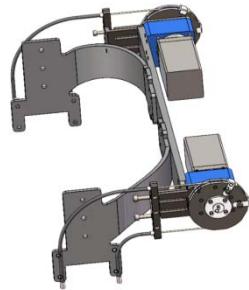


图3.2 驱动组件布局方案

分布于髋部两侧的髋部执行组件如图3.3，由驱动钢丝、滑轮组、牵引绳及限位装置构成精密传动网络。当作业人员在狭窄空间内进行弯腰、转身等动作时，牵引绳通过滑轮组的导向作用，将驱动组件的动力精准传递至髋关节活动区域，辅助完成屈伸动作。

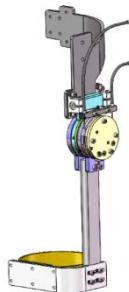


图3.3 髋部执行组件结构

3.2 控制系统设计

该控制系统以绳索伸缩长度为核心控制对象，采用位置控制策略，由传感器模块、控制模块、驱动模块和电源模块构成闭环控制体系如图3.4，其硬件架构与控制逻辑紧密围绕海洋作业的高强度搬抬需求展开设计。



图3.4 控制原理图

当作业人员执行下蹲搬抬动作时，IMU 检测到角度突变并激活控制模块，位移传感器同步记录初始位置；起身过程中，控制模块实时计算所需绳索伸长量，通过位置闭环控制驱动电机转动，牵引绳随人体运动同步释放，直至完成搬抬动作后电机停止。这种基于人体运动意图的主动助力机制，既避免了传统刚性外骨骼的机械滞后问题，又通过多传感器融合与三环控制策略，确保在海洋钻井平台的复杂工况下，为作业人员提供安全、高效的腰部助力支持。

3.3 创新设计

海洋环境适应性设计创新：提出“柔性机械系统+智能控制系统”的模块化架构，采用316L不锈钢导轨与碳纤维支撑板，结合陶瓷涂层处理，解决高盐雾、振动环境下的设备腐蚀与可靠性问题，整机重量控制在5kg以内，满足平台轻量化需求。

驱动与传动技术创新：突破传统背部驱动局限，将驱动组件布置于髋部两侧，通过绳索传动与滑轮组放大机制，实现375N辅助力输出，同时避免腰部前屈干涉，适配平台狭小空间作业需求。

人机协同控制创新：集成霍尔式非接触角度传感器与压阻式压力传感器，结合PID自适应控制算法，实现 $\pm 0.5^\circ$ 角度控制精度与1ms级响应速度，通过“助力比K=35%-50%”的转矩分配机制，平衡助力效能与人体运动自主性。

生物力学建模创新：基于AnyBody建立个体化人体骨肌模型，量化分析外骨骼对L5/S1椎间盘力矩的缓解作用，为助力策略优化提供动力学依据

4 结论与展望

本研究针对海洋钻井平台高负荷作业导致的腰背部肌肉骨骼损伤问题，设计了“柔性机械系统+智能控制系统”的腰部助力外骨骼。研究运用生物力学分析与多学科优化驱动设计方法，先是依据人体腰髋部解剖学特征构建生物力学模型，针对柔性机械系统，借助AnyBody软件对腰部受力状态给予优化，构建绳索传动动力学模型，其中辅助力与关节角度呈现非线性关系。智能控制系统则基于MATLAB/Simulink搭建PID闭环控制模型，经软件仿真得出控制参数，其流程涉及传感器信号采集、控制算法优化以及驱动响应调试这三个步骤。

往后，当海洋资源开发向深水、超深水区域迈进的时候，钻井平台的工作环境会愈发复杂，对于智能化人机协作装备的需求也会越来越大，腰部外骨骼助力系统研究可进一步加强多模态感知与自适应控制技术的融合程度，借助深度学习算法提前判断作业人员的动作意图，采用数字孪生技术打造虚实互动的即时仿真平台，从而改进控制策略的动态反应能力，按照海洋环境的多物理场耦合特性，可以探索外骨骼与平台智能监测系统深度融合的可能。