

# 助力型外骨骼机构研究分析

郝佳福

晋中学院 经济管理系

DOI:10.12238/jpm.v4i7.6116

**[摘要]** 近年来, 外骨骼技术研究成为了机器人研究的一项热门方向。外骨骼技术的研究, 基于对人体生理构造的模仿, 形成可穿戴, 并进行协助性的运动。其中助力型下肢外骨骼作为外骨骼技术的一个主要方面, 外骨骼技术也应用于老年人助走领域, 将会提高老年人下肢运动能力, 是老年人助走装置研究的新方向。但如何实现外骨骼与穿戴者的人体一体化, 却是业界面临的一大难题。对此, 本文提出, 对外骨骼的机构进行可调节性优化, 改善膝关节处的保护装置, 为实现外骨骼与穿戴者的人体一体化进行基础的结构创新。

**[关键词]** 外骨骼, 仿生, 结构设计

## Research and analysis of assisted exoskeleton

Hao Jiafu

Jinzhong University, Department of Economic Management, Jinzhong City, Shanxi Province 030600

**[Abstract]** In recent years, the research of exoskeleton technology has become a hot direction of robot research. The study of exoskeleton technology is based on the imitation of the physiological structure of the human body, forming wearable and assisting movement. Among them, the exoskeleton technology is also applied in the field of the elderly walking assistance, which will improve the lower limb exercise ability of the elderly, and is a new direction for the research of the walking assistance device for the elderly. However, how to realize the integration of the exoskeleton and the wearer's human body is a big problem facing the industry. In this regard, this paper proposes to optimize the adjustable of the exoskeleton, improve the protection device of the knee joint, and make the basic structural innovation for the integration of the exoskeleton and the human body.

**[Key words]** exoskeleton, bionics, structural design

### 一、绪论

#### 1.1 研究背景及意义

##### 1.1.1 研究背景

人体外骨骼研究系统早在20世纪60年代已开始在军事领域进行研究, 目的是提高士兵的负荷能力, 现已慢慢在民用领域展开研究。<sup>[1]</sup>其中应用最广的应为医疗及其工业领域, 旨在帮助残障及其老年人行走以及工人负荷承重, 搬运等, 目前也正朝着负重能力强, 控制及其灵活性能更高方向研究。

外骨骼起初作为一生物名词, 主要是为昆虫和壳类动物提供和防护和支撑作用。<sup>[2]</sup>随着科技水平的提高, 人们将这种能力及功能放到了机器人研究之中。

另一方面, 2021.05.11我国公布了第七次人口普查的结果, 我国现有总人数为141178万人。同上一次人口普查先比, 我国的人口老龄化正逐步加深。依据现有资料可知: 截止到2025年将突破3亿, 2033年突破4亿, 同时, 在2070年之前, 我国将一直是世界上老年人口规模最大的国家。由上述数据可知, 人口老龄化在我国的发展速度可见一斑。<sup>[3]</sup>外骨骼技术的发展不仅在康复领域应用率高, 也可以帮助脊髓损伤的人进行康复训练。

#### 1.2 下肢外骨骼运动机理分析

助力型外骨骼机器人在设计中参考了仿生学, 在此基础上, 通过对人体下肢外骨骼的运动机理进行深入研究, 以便为后续对外骨骼的优化设计提供有效的数据支持。本章将从人体的肌肉, 骨骼的运动机理进行数据化分析, 更加直接体现人体下肢的运动过程。

##### 1.2.1 人体肌肉骨骼和运动机理

肌肉收缩为躯体运动提供动力, 骨骼则作为关节, 相当于机构中运动链的部分, 因而骨骼关节的运动状态及方式, 决定了运动链的运动形式。

##### 1.2.2 人体下肢肌肉, 骨骼及运动机理

人在行走时, 主要依靠下肢髋关节, 膝关节以及踝关节的运动来实现, 其运动器官含: 骨骼肌, 肌腱, 关节。通过附着在骨骼上的骨骼肌的收缩舒张运动, 带动相关骨骼及关节运动, 完成行走。

上述过程类似于机械原理中的四连杆机构, 将骨骼肌带动骨骼关节的运动类比四连杆机构。<sup>[4]</sup>

##### 1.2.3 人体步态分析

基于对人体下肢肌肉, 骨骼的运动分析, 进一步对人体的步态进行观察分析, 以便更好的将外骨骼与下肢更柔顺的连接起来, 以便实现外骨骼与下肢的人体一体化。

髌关节是球状关节，是典型的三自由度的人体结构。其主要在于承受并将上半身的重量传至下肢，由屈肌以及伸肌两部分肌肉为它供能。【8】

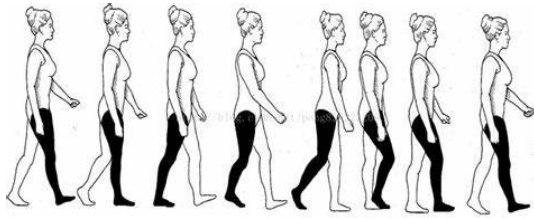


图 1-8 人体步态周期

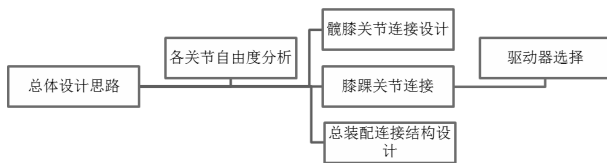
髌部在人行走过程中，会有一段小功率的爆发以及功率吸收。功率爆发发生在步态周期 50-75%，提供 0.14J/kg 的能量来协助摆腿。功率吸收发生在步态周期 35-50%。吸收 0.12J/kg，这些通过大腿肌肉收缩来实现的。

### 二、下肢外骨骼结构设计及驱动器选择

#### 2.1 下肢外骨骼结构设计方案

下肢外骨骼的结构设计，主要基于以往成熟样机制样的基础上，将外骨骼的设计进行优化，实现可调节，膝关节处除可以进行屈伸的运动外，增加防冲击的保护设计。

下肢外骨骼设计思路框架如下：



下肢外骨骼总体设计简图如下：

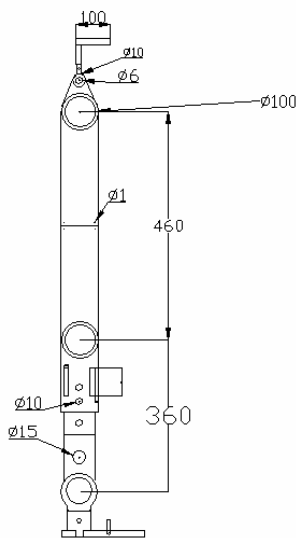


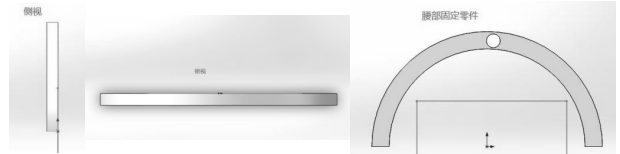
图 2-1 下肢外骨骼总体设计简图

#### 2.2 髌关节设计

外骨骼髌关节的设计需要遵循以下规则：

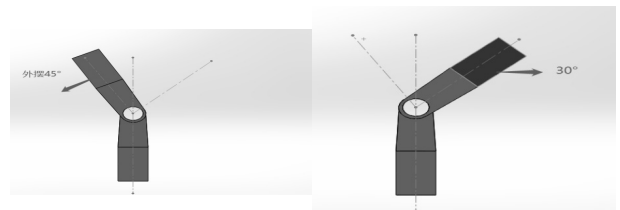
髌关节以屈伸运动为主，要实现三自由度的主动驱动，需要将髌关节本身的 3 自由度球状关节分解为 3 个单自由度的旋转副来替代。基于人体与机体的一体化设计，分解的 3 个单自由度的中心需要集合在一点处，以保证外骨骼与人体的适配程度。

腰部的固定采用圆弧结构，尺寸宽度由人体髌关节的宽度决定，可依据实际情况进行调节。



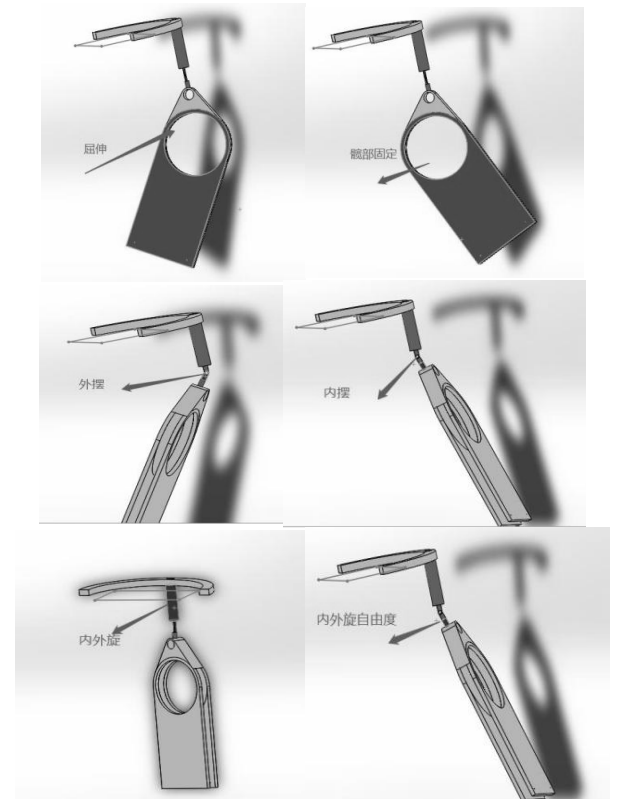
髌关节的内外旋是与腰部进行固定的圆弧结构一旋转副连接，内外旋的结构考虑到重量问题，内外旋的圆柱旋转结构为空心。

内外摆的固定与内外旋的旋转空心结构为一体，屈伸运动的固定于内外旋相似，内外摆的旋转角度分别为：左 45°，右 30°。



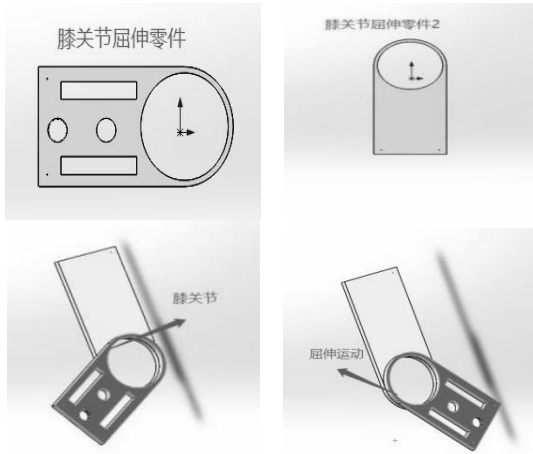
屈伸的设计由两个薄片于连接件相连，其中两薄片之间的空隙为 10mm，与膝关节配合的零件厚度相同。

髌关节设计整体以及运动系列如图：



#### 2.3 膝关节设计

从人体的步态分析中可知，膝关节运动可以进行屈伸以及一定的角度旋转，但内旋外旋的角度范围很小以及结构较为复杂，所以在进行膝关节的设计时仅考虑屈伸运动。设计一个与人体膝关节屈伸同轴的转动副来实现外骨骼的屈伸运动。其次，在膝关节设计时，还配备了可以用来保护膝盖的护膝套，以此来固定。

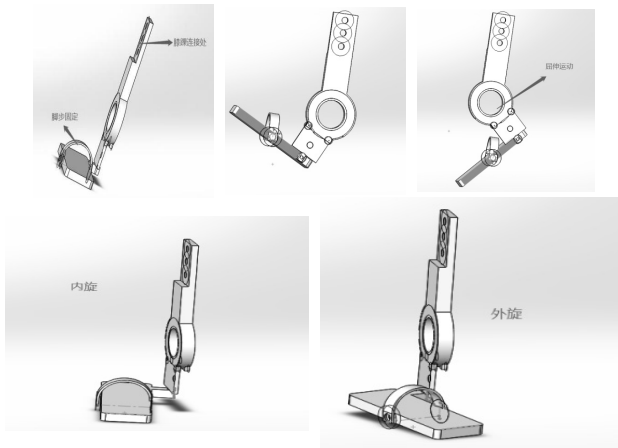


2.4 踝关节设计

与髋关节类似，踝关节同为 3 自由度，需要满足屈伸/内外摆/内旋外旋三个方向的运动。其结构设计同髋关节类似，分解的 3 自由度轴心需在同一中心，即踝关节中心。其中内摆和外收可通过平行连杆机构来实现。

踝关节的设计中，最主要的是进行屈伸的运动以及少量的内旋外旋运动，踝关节的内摆运动小部分会造成踝关节受震等情况，在设计过程中忽略。

具体设计如图



2.5 驱动方式

目前可供选择的驱动方式主要是：电机驱动，液压驱动，气压驱动三种方式，也是在之前已有的成熟外骨骼样机的基础上进行选择。三种驱动方式的特点如表所示。

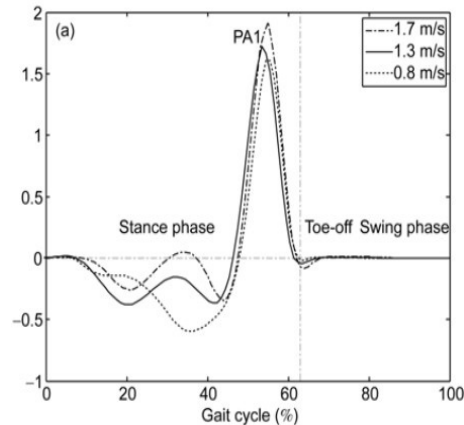
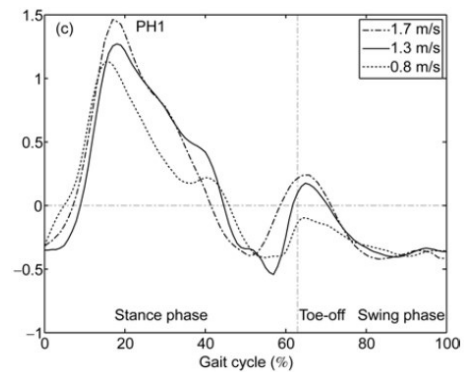
驱动方式	优势	局限	外骨骼样机
液压驱动	传动比高，容易控制，可实现无极调速，功率质量比高	能量使用率低，液压油易泄露，着火，噪音大	BLEEX 第三代样机
电机驱动	结构简单，无污染，响应速度快，易控制，精度高，维护方便	体积大，惯性大，换向慢	HAL-5 大力神
气压驱动	结构简单，成本低，无污染，可防火防爆，可高温工作	信号传递速度慢，平稳性差，难精确控制，空气易压缩，泄露	
被动驱动	结构简单，质量好，控制方便		

由表中可知液压驱动的主要优势为助力性能好，输出能量的密度集中，可以满足负载型外骨骼较高的关节驱动和功率要求。其次电机驱动的优势也很明显了，无污染，易驱动，噪音小，但相较于液压驱动，所能带动的负载重量比较小。由此可得，在满足日常需求以及工作要求的前提下，选择电机驱动。

2.6 驱动器选择

根据之前对人体步态周期的各关节的力矩以及功率的分析，经过计算可得选择符合要求的电机，实现髋关节，膝关节的驱动，下肢三关节的功率如下表。<sup>[9]</sup>

关节	活动	平均功率	平均力矩
膝关节	步行	16.01	40.5
	爬楼梯	35.3	87.0
髋关节	步行	7.03	60.0
	爬楼梯	16.23	84.7



其次，依据 BLEEX 对电机驱动的研究可得：在步行过程中，膝关节所作的功为负功，平均输出功率为 17W，效率为 21%。摆动相的力矩要小于电机的空载力矩，其中能量的消耗主要为克服摩擦力和惯性力。此时髋关节所需的功率为 81W。其中有有用功为 7.7W，效率为 9.5%。

在单纯的只考虑行走的情况下，可依据以下公式计算得出，电机的大致功率为：

$$P_{\text{膝关节}} = \frac{P_{\text{膝平均}}}{\eta_{\text{膝}}} \times 100\% = \frac{16.01}{21.02\%} \times 100\% \approx 76W$$

$$P_{\text{髋关节}} = \frac{P_{\text{髋平均}}}{\eta_{\text{髋}}} \times 100\% = \frac{7.03}{9.5\%} \times 100\% \approx 74W$$

因此电机应选择额定功率不小于 76W。

三、下肢外骨骼三维模型构建

3.1 三维模型方案分析

髋关节, 膝关节, 踝关节的设计方案在基于同人体适配的原则上进行的。

参照中国人体体格标准 (GB10000-88), 人体外形尺寸如下表。<sup>[9]</sup>

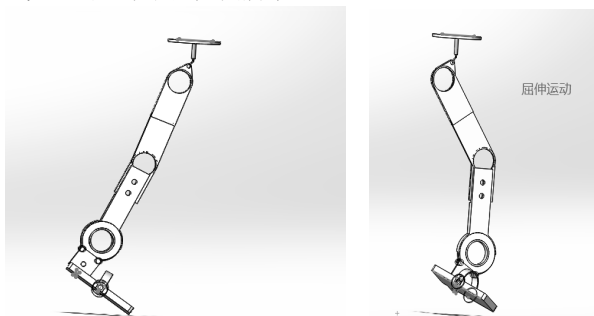
测试项目	身高	体重	前臂长	上臂长	大腿长	小腿长
男	1543	44	279	206	413	324
	1583	48	289	216	428	338
	1604	50	294	220	436	344
	1678	59	313	237	465	369
	1754	70	333	253	496	396
	1775	75	338	258	505	403
女	1449	39	252	185	387	300
	1484	42	262	193	402	313
	1503	44	267	198	410	319
	1570	52	284	213	438	344
	1640	63	303	229	467	370
	1659	66	312	234	476	375

由上表可看出, 正常男生的大腿长度在 413-505mm 之间, 小腿长度大致在 324-403mm 之间, 取平均身高, 三维建模中, 大腿长度应选取 460mm, 小腿长度为 360mm。此设计基于男生的尺寸, 女生尺寸可依据大腿长度为 430mm, 小腿长度为 330mm。

### 3.2 下肢外骨骼三维构建

外骨骼的三维结构装配图分别由髋关节的三自由度的屈伸/内外摆/内外旋, 膝关节的屈伸, 踝关节的三自由度运动组成。其中髋关节与膝关节之间的距离采用 460mm, 膝关节与踝关节之间的距离采用 360mm。

完整的三维装配如图所示。



3.3 外骨骼二维尺寸图

详细图解见附件一

### 3.4 外骨骼应用

日常生活中, 外骨骼的应用还处于发展阶段。本设计的主要用途为老年人在日常生活中由于脊髓损伤会出现跌倒甚至无法行走的情况。此结构重量轻, 可穿戴, 方便储存和携带。同时它也可以用来帮助伤残认识进行前期的康复训练。

## 四、总结

### 4.1 全文总结与创新点

#### 4.1.1 全文总结

外骨骼的研究正是科技研究的热点, 在民用领域的研究也才进入飞速发展阶段。随着我国老龄化的程度极具加快, 老年人的身体健康成为了一个重要的社会热点。

据中国疾病监测系统的数据显示, 跌倒已经成为了我国 65 岁以上老年人因伤致死的主要原因, 根据数据测算, 我国每年大约有 4000 多万的老年人至少会发生一次跌倒, 而这其中则

有一半发生在家中。<sup>[10]</sup>

本课题的目标旨在优化外骨骼的结构, 使之更能适应人体的运动。

主要研究方面包括:

对外骨骼的研究背景, 方向以及国内外研究现状进行了分析与比较。外骨骼的研究虽是近些年来才兴起的, 但它的发展及其后续的研究价值身, 应用面广。对人体的运动机理与步态进行了分析。人在运动时, 主要由髋关节, 踝关节, 膝关节来维持人的正常行走与运动。

#### 4.1.2 创新点

在髋关节处, 采用了简单的结构设计, 旨在减少连接处的重量, 以便达到轻松, 柔顺的效果。

在膝关节处, 在仅有屈伸这一个运动的情况下, 基于保护膝盖的原则, 在设计时, 增加了可以与仿生护膝配合的槽口, 在剧烈运动的情况下, 可减少对膝盖的损伤。

踝关节与髋关节相同都是 3 自由度的结构, 踝关节处采用了与髋关节不同的连接结构, 目的是可以在帮助行走助力外, 还需要考虑运动时的状态。

### 4.2 研究问题与结果

外骨骼的研究, 在我们学习和设计的过程中, 还存在一些问题。在进行外骨骼的研究分析时, 缺少对外骨骼技术等资料的深入研究及学习。髋关节的设计思路从最开始的使用滑块, 到最后的铰链连接都是在一步步推翻与重整的过程。基于髋关节与踝关节均有 3 自由度的基础上, 如何将屈伸/内外摆/内外旋结合起来是一项很大的挑战。本课题在不断的研究中取得了初步的进展, 改善了外骨骼的机构, 在一定程度上推进了外骨骼技术上的发展, 同时也顺应了科技发展的浪潮。

## 【参考文献】

- [1]都军民, 戴宗妙. 外骨骼研究现状及面临的问题【J】. 现代制造工程, 2019, 3: 154-161.
  - [2]汪逸丰. 外骨骼技术国内外发展现状(一): 前景及现状【J】. 装备制造, 2018.
  - [3]国家统计局. 第七次全国人口普查公报(第二号). 2021.05.11
  - [4]周加永; 莫新民; 张昂; 孟小净; 赵浩; 纪平鑫. 外骨骼助力机器人研究现状及关键技术分析【J】. 兵器装备学报. 2016.10; 99-104
  - [5]邢凯, 赵新华, 陈炜等. 外骨骼机器人的研究现状及发展趋势【J】. 医疗卫生装备, 2015.1; 104-107
  - [6]柯显信; 陈玉亮; 唐文彬. 人体下肢外骨骼机器人的发展及关键技术分析【J】. 机器人技术与应用, 2009.6; 28-32
  - [7]张峻霞, 李威, 张遵浩, 等. 康复用下肢外骨骼结构设计及仿真【J】. 天津科技大学学报, 2019.1; 59-63
  - [8]张峻霞, 杨喜飞. 助力式下肢外骨骼机构设计与分析【D】. 天津科技大学 2012.3; 10-14
  - [9]陈芳, 尚建忠. 助力型外骨骼仿生结构设计【D】. 国防科技大学 2018.10.33-35
  - [10]赵彦峻, 徐诚. 人体下肢外骨骼设计与仿真分析【J】. 系统仿真学报. 2008.17.4756-4759.4766
- 基金项目: 本文系 2022 年度晋中学院大学生创新创业训练项目(项目级别: 国家级, 项目名称: 黎明动力, 项目编号: 202210121026)阶段性研究成果, 并受上述基金计划资助。
- 作者简介: 郝佳福(2002—), 男, 汉族, 内蒙古自治区乌海人, 晋中学院经济管理系经济学 2020 级 02 班本科生。