**Artificial Intelligence and Robotics Research** 人工智能与机器人研究, 2022, 11(3), 288-298
Published Online August 2022 in Hans. http://www.hanspub.org/journal/airr
https://doi.org/10.12677/airr.2022.113030

Hans汉斯

# 康复机器人模块化设计研究

**吴德帅[1*]，王春宝[1,2,3,4#]，韦建军[1]，刘铨权[2,3]，周熙晔[1]，段丽红[2,3]，张　鑫[2,5]，刘　琦[2,3]，吕筱薇[4]**

[1]广西科技大学，机械与汽车工程学院，广西　柳州
[2]深圳大学第一附属医院，广东　深圳
[3]深圳市第二人民医院，广东　深圳
[4]广东铭凯医疗机器人有限公司，广东　珠海
[5]深圳市大鹏新区南澳人民医院，广东　深圳

收稿日期：2022年6月9日；录用日期：2022年8月8日；发布日期：2022年8月16日

## 摘　要

**模块化机器人是将机器人复杂的整体结构通过功能的不同划分成多个模组并进行模块化组合，每个模组发挥着不同的作用但又相互关联，相比于传统机器人繁杂的设计和工作的局限性，模块化机器人具有功能多样化、操控范围广、通用性强、扩展性高、制造成本低等多重优点，现已成为机器人领域的一重要研究方向，康复机器人作为一种新型的机器人种类，涉及多学科知识交叉融合，包含康复医学、计算机科学、机械电子等诸多领域，正因为如此使得康复机器人架构非常复杂，如果熟练的运用模块化设计方法，可以有效地制造出功能优越，满足人们需求的康复机器人种类。本文的主要内容是对康复机器人模块化设计研究做一个论述，包括机器人模块化设计的研究进展、模块化设计的研究内容以及在康复机器人方面的应用等，并在此基础上分析可能存在的问题，和对未来的研究方向和发展趋势作出展望。**

## 关键词

**康复机器人，模块化设计，功能块**

# Research on Modular Design of Rehabilitation Robot

**Deshuai Wu[1*], Chunbao Wang[1,2,3,4#], Jianjun Wei[1], Quanquan Liu[2,3], Xiye Zhou[1], Lihong Duan[2,3], Xin Zhang[2,5], Qi Liu[2,3], Xiaowei Lyu[4]**

[1]School of Mechanical and Automotive Engineering, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou Guangxi
[2]The First Affiliated Hospital of Shenzhen University, Shenzhen Guangdong
[3]Shenzhen Second People's Hospital, Shenzhen Guangdong
[4]Guangdong Mingkai Medical Robot Limited Company, Zhuhai Guangdong

[*]第一作者。
[#]通讯作者。

文章引用: 吴德帅, 王春宝, 韦建军, 刘铨权, 周熙晔, 段丽红, 张鑫, 刘琦, 吕筱薇. 康复机器人模块化设计研究[J]. 人工智能与机器人研究, 2022, 11(3): 288-298. DOI: 10.12677/airr.2022.113030

[5]Shenzhen Dapeng New District Nan'ao People's Hospital, Shenzhen Guangdong

Received: Jun. 9th, 2022; accepted: Aug. 8th, 2022; published: Aug. 16th, 2022

## Abstract

**Modular robot is to divide the complex overall structure of robot into multiple modules and carry out modular combination through different functions. Each module plays different roles but is interrelated. Compared with the complicated design and work limitations of traditional robots, modular robot has multiple advantages such as diverse functions, wide control range, strong universality, high expansibility and low manufacturing cost, It has become an important research direction in the robot field. As a new type of robot, rehabilitation robot involves the cross integration of multi-disciplinary knowledge, including rehabilitation medicine, computer science, mechanical electronics and many other fields. Because of this, the structure of rehabilitation robot is very complex. If you skillfully use the modular design method, you can effectively create a kind of rehabilitation robot with superior functions and meet people's needs. The main content of this paper is to discuss the research on modular design of rehabilitation robot, including the research progress of modular design of robot, the research content of modular design and its application in rehabilitation robot. On this basis, the possible problems are analyzed, and the future research direction and development trend are prospected.**

## Keywords

**Rehabilitation Robot, Modular Design, Function Block**

Copyright © 2022 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. 绪论

### 1.1. 模块化机器人发展历程

模块化机器人的概念最早可以追溯到 20 世纪 70 年代中期，当时在由计算机控制的机械中出现了“快速切换”这一概念，将具有不同功能的模块装配到机械手臂的末端。在随后的发展中，20 世纪 80 年代，Toshio Fukuda 把“快速切换”这一概念应用在了分子机器人上，于是就出现了模块化机器人的概念。这种类型的机器人由相同结构的模块组成，通过控制连接结构，能够形成多种构型的机器人系统，随着科技水平的飞速发展，尤其是现如今机械制造技术、电子制造技术、控制系统等多领域的核心技术得到了大幅度的提升，对于机器的反应精度和协同速度要求越来越高，促使了模块化技术发展的越来越成熟，快速推进了模块化机器人的发展进程[1]，并且模块集成度越来越高，尺寸越来越小，模块化机器人的应用从工业领域扩展到空间操作、救灾探测、医疗康复、教育服务等诸多领域。例如代替人类重复性劳动的工业机械臂、灾后复杂环境的模块化蛇形探测机器人[2]、用于患者术后康复的外骨骼机器人以及用于教育的儿童示教教学机器人[3]等，相对于传统机器人的设计，结构设计复杂，多种功能冗杂在一起，依靠单一的主控制器对各种任务需求做出反应，会出现响应错误，反应慢等缺点，模块化机器人具有更好的柔性，强大的容错性，响应速度快且功能表达精准，遇到故障维修比较容易，而且成本比较低。模块化的结构相对来说没那么复杂，易于加工制造，而且每个工作模组之间可以进行替换，由于模块化机器

人具有可重组性的结构和功能，能够适应多种工作环境。将机器人运用模块化的技术，会方便机器人的维修和保养，同时也大大减少了机器人结构设计的周期，降低了生产成本，提高了研发效率[4]，目前越来越多的领域开始对模块化机器人进行研究。

### 1.2. 研究现状

对于机器人模块化的研究，我国和国外都有自己成体系的技术，相比于国内，国外更早开始研究模块化机器人，在上个世纪，美国卡内基梅隆大学研究出一款名为 RMMS 的机器人，这是世界上第一台真正意义上的模块化机器人，国外的机器人系统较早被用于产业化，比如瑞士研发出的 Omega7.0 机器人，美国研发出的 phantom Desktop 等。但是这些早期研究制造出的机器人大多具有固定的结构，构造比较单一，不能根据用户需求灵活转变，且对于不同的任务要求无法在构造上做出对应的改变，功能单一化，当现实情况发生变化时，主机器人无法做出应对从而不能完成指定的工作[5]，所以必须再次研发其他类型的机器人，大大增加了制造的成本，浪费大量的人力财力。由此可见，主机器人的通用性研究是需要重点解决的问题。

21 世纪以来，我国涌现出了许多机器人研发团队对于模块化机器人进行了大量的研究，其中由于工业机器人用途范围广，需求量大，国内对于工业机器人的研究还是占大多数，比如哈尔滨工业大学研发出一种可重构的模块化机器人系统[6]，这种可重构模块可以根据不同的需要组合成多种阵列网格式的整体构型，所以构造出来的模块化机器人在整体结构上既具有阵列式的特点，又具有串联式的特点，这种模块化机器人系统采用的是相对方位矩阵来解释模块之间对应的联系以及模块周围的环境，提出构造了模块化机器人各个模块之间的运动规律系统。南京航空航天大学研发出一种可重构模块化机器人，机器人包括操作模块、运动模块、连杆模块和载荷功能模块，此款机器人可根据任务需要进行模块的重构组合。清华大学相关研究人员提出了一种可重构机器人的单元组合模块理论，设计出机器人的旋转、摇摆、振动等运动关节，设有旋转和摆动模块单元，这些模块具有独立的结构，此外还设计出了一系列的辅助模块单元可以协助系统整体完成重构，丰富了系统的结构，增加了系统的多样性，大大降低了模块化机器人的设计和制造难度[7]。

相对而言，我国目前对于模块化机器人技术的研究还不够成熟，而且模块化机器人也大多应用于一些高端的领域，多数集中在一些大学及研究所的科研领域的研究。模块化机器人所具有的灵活性、对环境的强大适应性以及工作范围的可扩展性等优点[8]，必然会成为未来机器人领域的一个主要趋势，特别是随着人类对外太空等一些人类无法到达领域的涉足，对于这些情况就更需要比传统机器人更优越的机器人来取代人类进行探索。

## 2. 模块化设计的含义及内容

### 2.1. 模块化设计的含义

模块化设计，简言之就是在编写系统的程序时不是挨个输入相关的计算机语句和指令，而是首先用主程序，子程序，子过程等框架把软件的主要结构和流程描述出来，并且定义和调试好各个框架之间的输入，输出连接关系，逐步求精的结果得到一系列以功能块为单位的算法描述。

模块化设计的目的是为了以少变应多变，同时可以降低程序的复杂度[9]，使得程序的设计，调试和维护等操作变得简单，如果想改变系统的某个子功能只需改变功能对应的模块即可实现目的。

### 2.2. 模块化设计方法

在进行模块化的设计时，首先必须进行模块的分解，先按照一定的标准或制造需求将系统分解成若干个模块，然后以模块为基本单元进行构型设计。不同的模块执行系统的不同功能，每一模块对于系统的整体构造都是不可或缺的因此，合理地对系统进行模块化划分对于整个机构的性能、外观以及制造维修成本等方面

都有很大的影响。模块划分有很多原则，例如按照物理功能进行划分可以分为机械、电气、软件等、按照制造方式进行划分、按照系统的组成结构进行划分等，不同的划分方式所得到的系统会差别很大，制造的过程和功能属性也会存在很大的差异，机器人系统作为一个融合了控制、电子、机械、计算机等多个领域的复杂的机电系统，以机械结构为基础向上对系统进行分解是一种合理的模块化划分方法。通常，模块化产品的构成模式可以用一个公式进行表达：系统 = 通用模块(不变部分) + 专用模块(变动部分)，通用模块即系统基本的结构，专用模块可以根据机器的使用目的进行个性化添加。要到达目标并操作以完成任务[10]，机器人系统一般具有移动和作业两个基本的功能。机器移动是由驱动器带动适当构型的关节结构来实现的，而作业功能通常是由所谓的执行器来完成，此外系统还添加各种类型的传感器用来接收运动产生的信号等。

### 2.3. 模块划分原理

模块的划分及创建原理有两种，一种是基于功能分析的模块创建原理，一种是基于相似特征聚类的模块创建原理。基于功能分析的模块创建原理，主要对产品进行功能分解，建立功能层次模型，然后在该模型基础上结合模块划分中的功能独立、结构完整等原则进行模块的划分。基于相似特征聚类的模块创建原理，主要是根据模块的功能属性，区别出不同功能和相似功能，进行模块的整合和构造。

## 3. 模块化康复机器人

### 3.1. 模块化机器人系统

模块化机器人系统是由一套具有相同连接方式的模块构成，根据机械结构及功能的不同可分为关节模块、连杆模块、执行器模块、辅助功能模块等，以上模块之间采用不同的连接方式，可快速实现模块化机器人的重构，通过将这些模块进行恰当的组合，可以得到多种不同类型的机器人。例如机械臂、攀爬机器人、步行机器人、轮式机器人等。如图 1 所示为某种模块化机器人系统功能结构[10]。

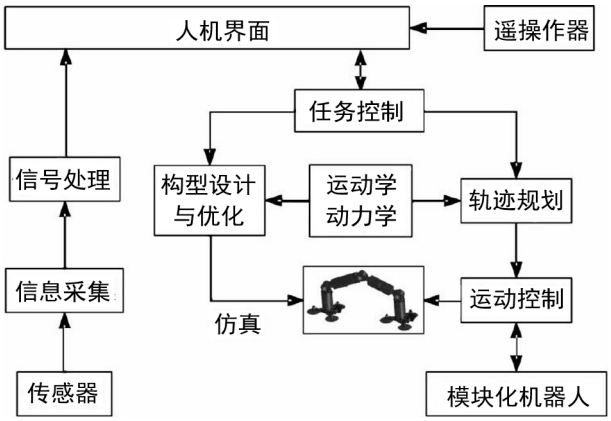


**Figure 1.** Functional structure of modular robot system
**图 1.** 模块化机器人系统功能结构

### 3.2. 康复机器人的概念及发展前景

#### 3.2.1. 康复机器人的概念

康复机器人作为机器人的一种，准确来说是医疗机器人的一种重要类型，主要用于患者的术后康复及某些疾病的治疗，它是一种由驱动器带动的自动化多功能机器，通过设计相关程序可以模仿人的各种功能运动模式，通过传感器将感应到的信息整合并制定程序，输入信息，康复机器人会根据任务导向性环境带动或者提示患者做成千上万次的重复性运动，对控制肢体运动的神经系统刺激并完成重建，从而

达到病肢康复的目的。这是一个多学科交叉、多领域融合的研究方向。康复机器人主要分为可穿戴式外骨骼机器人和非穿戴式移动式康复机器人，有上肢康复、下肢康复等分类，有针对全身的也有专门针对手腕，脚腕等部位的机器人类别。

### 3.2.2. 康复机器人的发展前景

根据相关调查数据显示：2004 年全球康复机器人的市场份额是 2.2 亿美元，预计到 2023 年将会达到 40 亿美元。国内潜在的康复市场的份额是 4000 亿元。2020 年国内康复产业市场达到了 7000 亿元，见图 2 [11]。国内目前现有康复医疗机构7000家左右，但是真正能够提供患者康复训练的只有不到1/3的比例，显然这无法满足众多康复患者的需求，而且我国的人口老龄化比例还在不断升高，据研究者预测，到 2025 年中国的老年人总数将超过 3 亿人，2033 年将达到 4 亿人，2050 年，全球 60 岁以上人数将达到 20 亿[12]。众多的老年人口数带来的将是医疗救治与康复训练上的巨大压力，中风作为老年人群中的高发疾病，病后或多或少都会带来一些肢体上的障碍，所以康复治疗的重要性不言而喻，但是术后康复是个漫长而艰辛的过程，需要消耗大量的人力、物力和时间[13]，而我国现在康复治疗师的缺口很大。现有的传统康复训练室中普遍是一些非常简易的设备，无法做到很好的人机交互，但是有效的康复训练需要能够时刻感知患者的训练状态，避免造成二次伤害，对人机交互的要求很高，于是为了弥补这种耗时费力效果还差的不足，康复机器人应运而生，但是相比于手术机器人来说，由于康复机器人的造价高，普及率较低，我国目前对康复机器人的研究还不够成熟，且康复机器人的研究需要与临床相结合，所以大多还只是在一些经济发达的城市医院出现，未来还有很大的发展空间。

**Figure 2.** Status of rehabilitation robots
**图 2.** 康复机器人现状

由于康复机器人与工业机器人的适用领域不同，在功能和结构上还是存在一些差异的。关于康复机器人相比康复训练师的治疗效果[14]，国际上曾经做过一些验证，康复机器人可以辅助患者的双手做简单的抓握训练，而且通过康复机器人以及康复训练装置对患者的训练，结果显示能够有效恢复中风患者的上肢或下肢的运动机能，证明了康复机器人可以代替治疗师完成康复训练。

### 3.3. 模块化设计方法在康复机器人中的应用

康复机器人结构复杂，实现功能多样化，采用模块化的理念研究制造康复机器人，将机器人整体结构按照功能或区域不同实现不同功能模块的组合，不仅可实现多种运动模式，而且操控精度也更高，增加了容错率，使用和维修也更加的方便高效[15]。下面表 1 介绍几款模块化康复机器人。

**Table 1.** Modular robots
**表 1.** 模块化机器人

| 名称 | 组成 | 特点 | 适用症 |
|---|---|---|---|
| 大脑激励全身外骨骼系统 | BCI 模块、控制单元、<br>车身部件驱动模块 | 非侵入式系统、<br>适用于不同程度瘫痪患者使用 | 躯体瘫痪 |
| 膝－踝－足机器人矫形器 | 膝关节驱动模块，踝关节支撑模块、<br>位置感知与控制模块 | 低成本、重量轻、模块化、便携式 | 脊髓损伤 |
| 腕关节康复训练机器人 | 电源模块、主控制器模块<br>动力驱动模块 | 可单独训练腕关节、或配合上肢<br>及手部康复设备进行综合动作训练 | 腕部康复 |

可穿戴式外骨骼康复机器人是目前效果较为显著的一种康复机器人种类，但是大多数现有的外骨骼都有重量、灵活性和适应性的限制。易穿戴性和便携性是当前基于辅助外骨骼的康复解决方案面临的其他重大限制[16]。为了克服目前外骨骼存在的问题，国外有研究者们提出了一种自适应和灵活的大脑激励全身外骨骼(BFBE)来帮助瘫痪的人。在 BFBE 系统中，脑电图传感器捕获的大脑信号用于控制外骨骼的运动[17]。灵活性通过模块化设计方法融入系统。BFBE 系统有一个 BCI 模块、一个控制单元和一个车身部件驱动模块。BCI 模块捕获大脑信号，并将其转换成可供大脑使用的信号[18]。这一过程发生在边缘，从而减少了决策的延迟，系统集成了一个在紧急情况下帮助向多个护理人员发送警报消息的集成模块。该系统是非侵入式的，利用制作的脑电传感器采集脑电信号。增强获得信号的强度。放大器的输出信号经过滤波和预处理[19]。信号是为不同的基本人类行为(坐、站、睡)产生的，然后经过预处理后存储在数据库中。当瘫痪的人想要做一个特定的动作时，控制单元中的微控制器使用这个数据库并产生激活该粒子的信号，电脑采集信号通过驱动模块带动患者做出相应的行为动作。

大脑激励全身外骨骼系统的架构如图 3 所示[20]。BFBE 系统有三个主要模块：1) BCI 模块、2) 控制单元、3)车身部件驱动模块。脑电图传感器捕获的大脑信号用于控制外骨骼的运动。灵活性通过模块化设计方法融入系统。零件和关节可以很容易地连接和拆卸，使其可以被不同程度瘫痪的人使用[21] [22]。对于完全瘫痪的人，可以使用全身外骨骼结构。该系统通过对十个不同的瘫痪者使用六种自然动作，收到了很好的效果，证明了此种模块化系统设计的优良性能[23]。

脊髓损伤是当今社会普遍存在的一种损伤。世界上每年有 25 万到 50 万人遭受这种伤害，交通事故、跌倒和暴力是其三个主要原因。脊髓损伤后无法行走会降低患者的生活质量，增加久坐的生活方式，进而导致其他继发性并发症，脊髓损伤后的步态康复对患者来说是一个高度优先的问题[24]，在这里提出了一种轻型模块化机器人外骨骼的设计和控制。

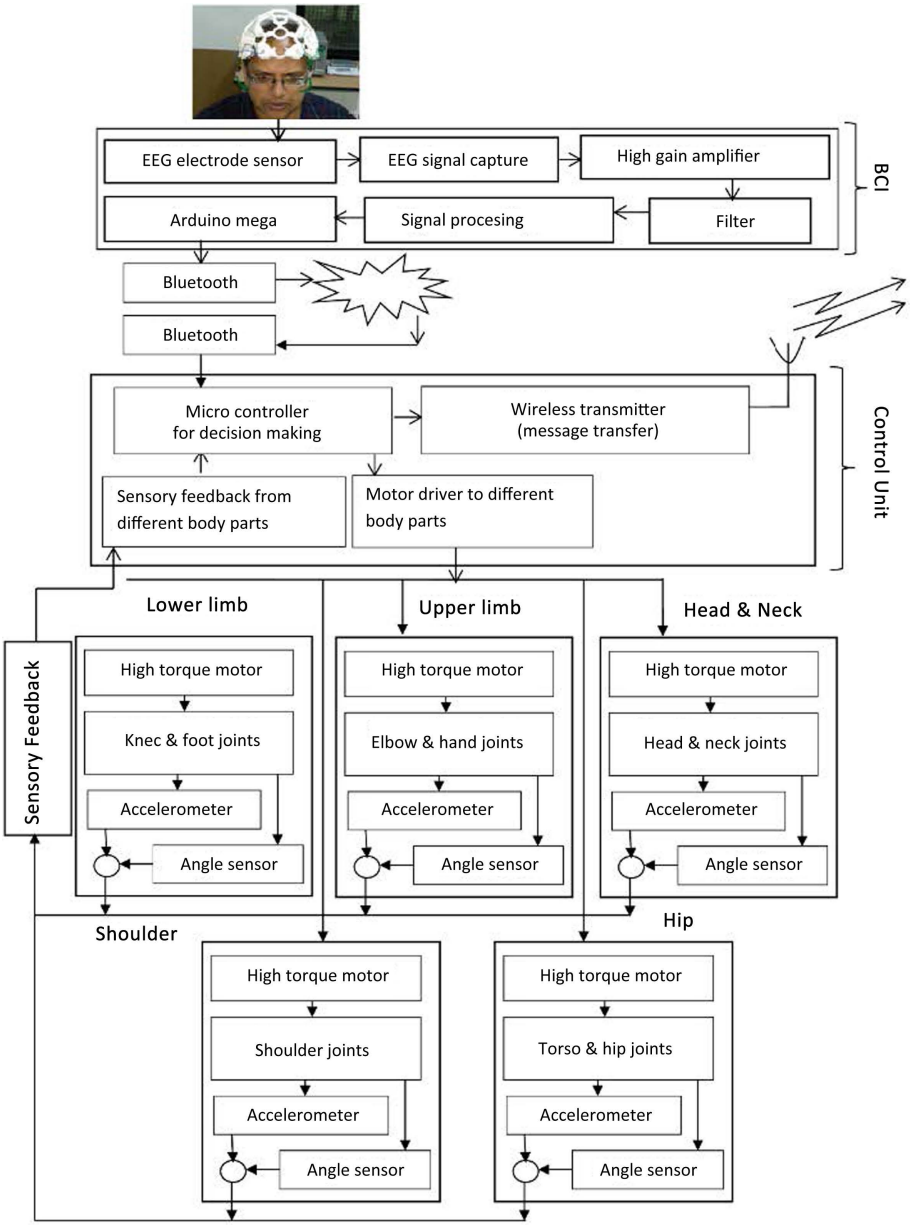


**Figure 3.** System architecture: brain motivates the whole body exoskeleton
**图 3.** 系统架构：大脑激励全身外骨骼

这是一种新型的低成本、重量轻、模块化的膝－踝－足机器人矫形器，专门针对脊髓损伤患者而设计，保留了髋关节的运动功能，这款机器人矫形器有两个关节：膝关节是由一个与谐波驱动齿轮箱(膝关节驱动系统)串联的电机进行驱动，踝关节是由一个塑料支架进行被动驱动，以避免患者在行走时脚部下垂。工作的重点是膝关节的驱动系统和设备控制系统的机械设计。如上面的图 4 所示[25]，膝盖的驱动模块是由 DC 电机和谐波传动齿轮箱所组成。而另一方面，自主控制架构是基于两个惯性测量单元来检测每一步的姿态到摆动的转换[26]，以及跟踪摆动期间期望的膝盖弯曲轨迹的 PID 位置控制(在姿态期间，膝盖被锁定在完全伸展位置)。为了确保整个系统模块化，该装置使用了完全适合标准矫形支架和支撑的附件，并且将所有的传感器都连接到了矫形器结构上，以此避免了与舒适性、安全性、可靠性和穿/脱相关的问题。另外这个系统是便携式的，患者可以将其穿戴在身上，根据需要随时随地的进行康复训练，

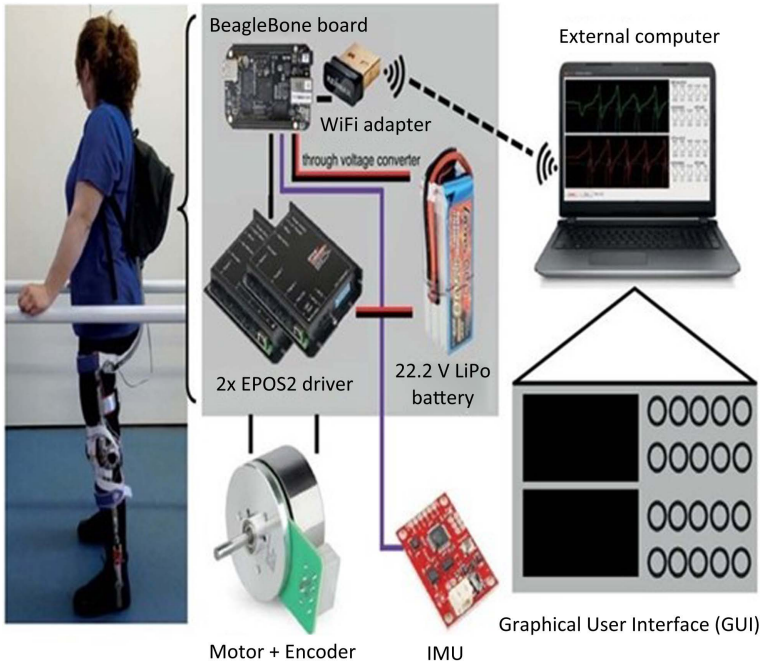


**Figure 4.** Overall control architecture
**图 4.** 总体控制架构

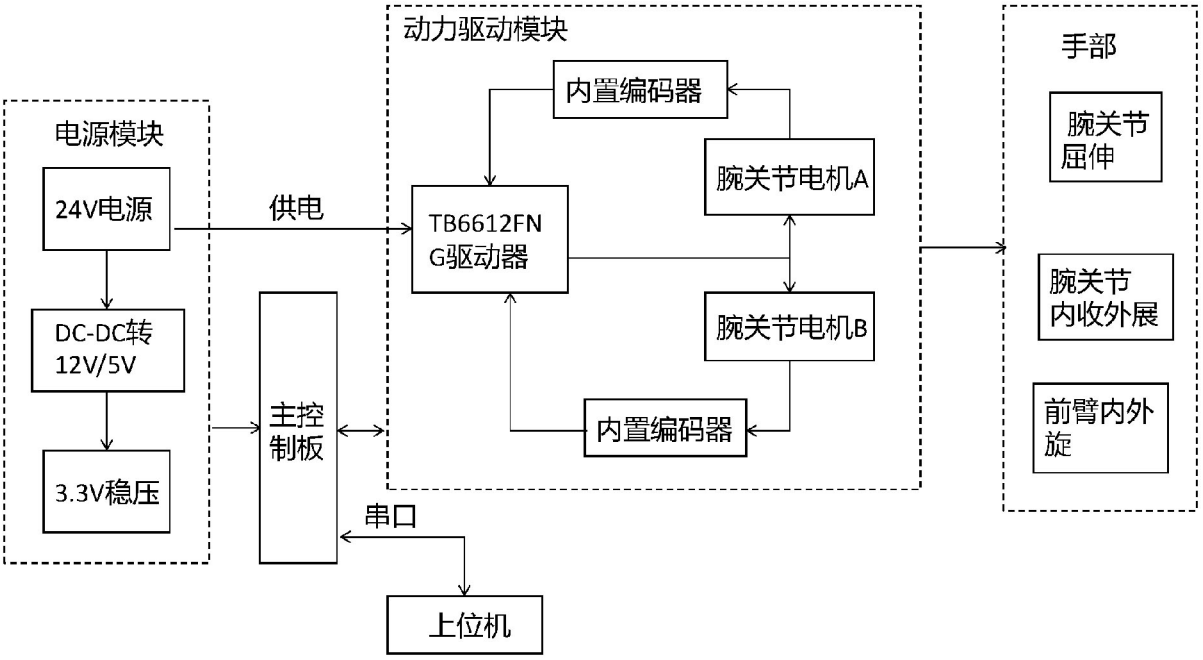


**Figure 5.** Overall framework of the control system
**图 5.** 控制系统整体框架

用户只需要戴着一个背包，在里面装有一个 BeagleBone 黑板、还有电机驱动器和电源单元[27]。此外，该设备被认为可以让患者在家庭环境中独立使用，并且可以通过计算机界面或移动应用程序进行操作。与之相类似的还有一种具有紧凑和模块化致动的 LLE 设计。作为传动装置的同步驱动和齿轮的驱动分别用于分配臀部和膝盖致动器，确保紧凑的轴向宽度。一个完整的电机组件和一个完整的齿轮箱组件通过

一些耦合结构同轴集成为一个关节致动器，关节致动器的模块化设计使得单独设计或选择符合人体工程学的外骨骼框架变得简单化，从而有利于患者的康复训练。

通过临床研究发现，因为脑卒中等心脑血管疾病引发的出现运动功能障碍的患者一般都会伴随有一定程度的上肢运动功能障碍[28] [29]，国内研究人员设计研发出一款专门针对腕部康复的外骨骼机器人，这款机器能够有效的帮助患者进行腕部的康复训练，恢复肢体运动功能。这是一款基于模块化理念设计的腕关节康复训练器[30]。通过对人体腕部关节的运动功能特性进行分析，并且采用模块化理念对机构和控制系统进行软硬件的设计，作为此款器械的核心控制部分，可分离式腕部训练机器人整体硬件电路设计包含电源模块、主控制器模块与动力驱动模块，各个模块之间分工与合作如下面的图 5 所示[31]，电源模块负责为整个系统提供稳定的电力支持，驱动模块通过内部编码器，电机以及驱动器带动手部进行不同模式下的肢体训练活动，每组模块各司其职，共同完成病人的康复训练。实验结果表明，这种基于模块化理念的腕关节康复训练器可以实现腕关节的单独训练以及配合上肢及手部康复设备进行综合动作训练。

## 4. 模块化康复机器人发展中的关键问题以及未来展望

模块化康复机器人将复杂的整机结构转化成具有不同功能的单元模块，优化了机械设计，降低了制造难度，相比于传统机器人具备了许多优点，已成为现阶段机器人研究领域的一个重要方向，但是还存在许多问题需要科研人员去攻克。

1) 面对机器人需要实现不同的任务时，如何实现模块之间的快速响应与联系，建立一种有效的模块设计系统，将机器人功能的实现与基本模块构型相对应，在今后模块化康复机器人的研究中，这是可以重要考虑的一个方向[32]。

2) 模块化康复机器人主要是由各种功能各异的模块组合，随着功能的优化，功能的多样性势必带来模块尺寸的缩小，增加更多的模块，但这样又会给机器整体的性能，能量消耗带来挑战，所以如何平衡模块性能与整机性能之间的关系也是需要解决的一个问题[33]。

随着模块化设计在康复机器人方面应用的越来越多，技术层次也越来越深，这势必会带来康复机器人性能的不断升级优化，灵活的变形能力和工作特性将会解决传统机器人许多无法解决的问题[34]，在医学康复领域，模块化康复机器人将担任更加复杂但更有效的康复任务，考虑到在满足性能的前提下，越来越多的患者要求能够达到康复训练的智能化和人性化，所以未来还有望在人机交互方面做更大的突破，力争模块化设计在康复机器人研发和制造方面发挥着越来越大的作用。

## 5. 结语

本文综述了模块化机器人的发展历程以及在康复机器人领域的应用，可以看出模块化的设计理念和方法在康复机器人的设计、制造和使用中发挥了非常重要的作用[35]，它在很大程度上优化了康复机器人的构造，降低了传统康复机器人在使用过程中可能对患者造成二次损害的隐患等缺陷，同时提升了系统的人机交互的性能，让康复训练变得更加安全而高效，但是由于康复机器人涉及的领域较多，制造的难度以及患者的使用成本还是挺高的，如何在进一步优化机器人性能的同时普及康复机器人的使用率，我们还需要在模块化设计等方面做更多的研究。

## 基金项目

国家自然科学基金(No. 61963007)，广东省基础与应用基础研究基金(No. 2021A1515011907)，深圳市基础研究面上项目(JCYJ20210324122200002)，广东省医学科学基金(No. B2021020)，深圳市大鹏新区医疗健康集团医疗卫生科研项目(2021JTLCYJ03)。

## 参考文献


[1] 李树民, 邸韬, 邸仕虎. 模块化工业机器人运动控制系统研究与设计[J]. 中国建材科技, 2019, 28(2): 108+107.

[2] 朱威, 郭宪, 方勇纯, 张学有. 可重构模块化蛇形机器人研制及多运动模态研究[J]. 信息与控制, 2020, 49(1): 69-77.

[3] 祝洲杰, 甘伟, 黄畅, 胡章豪, 冯晨韬. 小型模块化多功能科教机器人的设计与实践研究[J]. 机电工程技术, 2020, 49(10): 138-140.

[4] 吴文强, 管贻生, 朱海飞, 苏满佳, 李怀珠, 周雪峰. 面向任务的可重构模块化机器人构型设计[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2014, 46(3): 93-98.

[5] 田闯. 工业机器人的现状及发展趋势研究[J]. 中国管理信息化, 2019, 22(20): 156.

[6] 陈维. 模块化自装配机器人的系统设计与研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.

[7] 李能菲, 常辉, 王奎. 基于 LabVIEW 的多控模块化机器人控制设计[J]. 电脑知识与技术, 2022(11): 107-109.

[8] Pezent, E., Rose, C.G., Deshpande, A.D., *et al*. (2017) Design and Characterization of the Openwrist: A Robotic Wrist Exoskeleton for Coordinated Hand-Wrist Rehabilitation. 2017 *International Conference on Rehabilitation Robotics* (*ICORR*), London, 17-20 July 2017, 720-725. https://doi.org/10.1109/ICORR.2017.8009333

[9] 郦滢澄, 虞泽宇, 张龙涵, 郭兆阳, 马新玲. 多功能模块化居家整理机器人的结构设计[J]. 轻工机械, 2020, 38(6): 86-91.

[10] 吴文强, 管贻生, 朱海飞, 苏满佳, 李怀珠, 周雪峰. 面向任务的可重构模块化机器人构型设计[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2014, 46(3): 93-98.

[11] 机器人大讲堂. 深度解析康复机器人的现状、机遇和未来[EB/OL]. http://www.compsys.ia.ac.cn/kfjiqiren.html, 2018-04-12.

[12] 戴野, 张启昊, 高语斐, 等. 自重构模块化机器人模块设计综述[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2021, 26(5): 34-43. https://doi.org/10.15938/j.jhust.2021.05.005

[13] 薛建明. 医疗外骨骼康复机器人的发展[J]. 医学信息, 2019, 32(9): 11-13.

[14] Jacob, S., Menon, V.G., Al-Turjman, F. and Mostarda, L. (2019) Artificial Muscle Intelligence System with Deep Learning for Post-Stroke Assistance and Rehabilitation. *IEEE Access*, **7**, 133463-133473. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2941491

[15] 韩稷钰, 王衍鸿, 万大千. 下肢外骨骼康复机器人的研究进展及发展趋势[J]. 上海交通大学学报(医学版), 2022, 42(2): 241-246. https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8115.2022.02.017

[16] Lee, W., Kim, S., Kim, B., Lee, C., Chung, Y.A., Kim, L. and Yoo, S.-S. (2017) Non-Invasive Transmission of Sensorimotor Information in Humans Using an EEG/Focused Ultrasound Brain-to-Brain Interface. *PLOS ONE*, **12**, e0178476. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0178476

[17] Sarac, M., Solazzi, M. and Frisoli, A. (2019) Design Requirements of Generic Hand Exoskeletons and Survey of Hand Exoskeletons for Rehabilitation, Assistive, or Haptic Use. *IEEE Transactions on Haptics*, **12**, 400-413. https://doi.org/10.1109/TOH.2019.2924881

[18] Shepherd, M.K. and Rouse, E.J. (2017) Design and Validation of a Torque-Controllable Knee Exoskeleton for Sit-to-Stand Assistance. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, **22**, 1695-1704.

[19] Ao, D., Song, R. and Gao, J. (2017) Movement Performance of Human-Robot Cooperation Control Based on EMG-Driven Hill-Type and Proportional Models for an Ankle Power-Assist Exoskeleton Robot. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, **25**, 1125-1134. https://doi.org/10.1109/TNSRE.2016.2583464

[20] Jacob, S., *et al*. (2020) An Adaptive and Flexible Brain Energized Full Body Exoskeleton with IoT Edge for Assisting the Paralyzed Patients. *IEEE Access*, **8**, 100721-100731. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2997727

[21] Chen, B., Zi, B., Wang, Z., Qin, L. and Liao, W.H. (2019) Knee Exoskeletons for Gait Rehabilitation and Human Performance Augmentation: A State-of-the-Art. *Mechanism and Machine Theory*, **134**, 499-511. https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2019.01.016

[22] 李超. 外骨骼下肢康复机器人系统开发及其柔顺控制研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江理工大学, 2019.

[23] Feng, J.K. and Liu, J.G. (2021) Configuration Analysis of a Chain-Type Reconfigurable Modular Robot Inspired by Normal Alkane. *Science China* (*Technological Sciences*), **64**, 1167-1176. https://doi.org/10.1007/s11431-020-1816-0

[24] Ma, H., Chen, B., Qin, L. and Liao, W.H. (2017) Design and Testing of a Regenerative Magnetorheological Actuator for Assistive Knee Braces. *Smart Materials and Structures*, **26**, Article ID: 035013. https://doi.org/10.1088/1361-665X/aa57c5

[25] Moltedo, M., Bacek, T., Junius, K., Vanderborght, B. and Lefeber, D. (2016) Mechanical Design of a Lightweight Compliant and Adaptable Active Ankle Foot Orthosis. *Proceedings of the* 6*th IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics* (*BioRob*), Singapore, 26-29 June 2016, 1224-1229. https://doi.org/10.1109/BIOROB.2016.7523798

[26] Lugrís, U., Carlín, J., Luaces, A. and Cuadrado, J. (2013) Gait Analysis System for Spinal Cord Injured Subjects Assisted by Active Orthoses and Crutches. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K*: *Journal of Multi-Body Dynamics*, **227**, 363-374.

[27] Zhang, L. and Li, J. (2019) Improvement of Human-Machine Compatibility of Upper-Limb Rehabilitation Exoskeleton Using Passive Joints. *Robotics & Autonomous Systems*, **112**, 22-31. https://doi.org/10.1016/j.robot.2018.10.012

[28] 柴静. 手部康复机器人用户定制设计[D]: [硕士学位论文]. 秦皇岛: 燕山大学, 2019.

[29] Spaeth, A., Tebyani, M., Haussler, D. and Teodorescu, M. (2020) Spiking Neural State Machine for Gait Frequency Entrainment in a Flexible Modular Robot. *PLOS ONE*, **15**, e0240267. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0240267

[30] 石文韬, 孟青云, 喻洪流, 郭帅. 一种模块化的腕关节康复训练器设计与仿真[J]. 软件导刊, 2021, 20(2): 135-141.

[31] 李伟达, 王柱, 张虹淼, 李娟, 顾洪. 床式步态康复训练系统机构设计[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2021, 55(5): 823-830

[32] 刘开元. 链式可重构模块化机器人设计及重构策略研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2019.

[33] 刘策越, 刘建功, 刘扬, 等. 模块化机器人的模块形态特性[J]. 吉林大学学报(工学版), 2019, 49(1): 199-208. https://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxbgxb20170963

[34] 赵思恺, 李长乐, 张宗伟, 等. 模块化可重构外肢体机器人[J]. 哈尔滨理工大学报, 2021, 42(4): 218.

[35] 陈刚, 东辉. 自重构仿生四足机器人运动学分析及仿真[J]. 机械制造与自动化, 2021, 50(2): 95.