

外骨骼机器人关键技术漫谈

黄瑞 程洪 电子科技大学自动化工程学院



图1 外骨骼机器人

外骨骼原意是指是一种能够提供对生物柔软内部器官进行构型、建筑和保护的坚硬的外部结构。

外骨骼机器人是一种将人和机器人结合在一起的物理人机混合可穿戴设备（见图1）。

外骨骼系统可以分为两大类：助力外骨骼机器人与助行外骨骼机器人。助力外骨骼机器人即可以协助人们负重，增强人们运动能力的系统，主要应用于军事及民用领域；助行外骨骼机器人则能够帮助或带动人们行走，完成日常的

生活行动，主要应用于医疗领域。

1889-1890年，Nicholas Yagn设计了一系列行走、跳跃、跑步辅助装备，Nicholas Yagn在最初的版本里用了一个巨大的弹簧，最终经过改进后，它能够利用压缩气囊来储存能量，这是助力外骨骼机器人最初的模型。在1917年，Leslie C. Kelley设计了一款蒸汽驱动跑步装置“Pedomotor”，它将一个小型蒸汽机放在穿戴者的背后，其人造韧带平行于肌肉韧带，从而直接提供了动力源。

美国通用电气在1960年制造出的Hardiman是第一款真正意义上的助力外骨骼机器人，它最初的设计目的是让穿戴者能够轻而易举地举起1500磅（680kg）的重物。但是这个项目并没有成功，整个系统由30个液动力源和伺服随动铰链组成，采用主—从控制模式，能将人类四肢的力量放大25倍，虽然非常的不稳定，但开创了人类研发动力外骨骼的先河。后来对于Hardiman的研究集中于它的一只胳膊上，虽然它最终能够举起750磅的重物，但是它本身的重量却有3/4吨，几乎超过了重物的两倍之多。

美国洛斯阿拉莫斯国家实验室在1961年启动了“Pitman”的动力盔甲项目，自重227kg并能携带136kg的装备。“Pitman”提出了氢/氧燃料电池、内置辅助动力单元和空调、电驱动人造肌肉驱动、大脑意念感应操纵等概念。

随后在1978年，美国麻省理工学院启动了动力外骨骼项目的研究，这套系统总重量11.7kg，能让穿戴者在负重36kg的情况下保持每秒1m的行走速度，并将80%的负重传递到地面，同时里程碑式地采用了弹簧储能和变阻尼器关节驱动。这套系统虽然至今尚未成功，但却为日后动力外骨骼装置的设计确定了框架。

从1983年开始，美国盐湖城的SARCOS公司开始着力于动力外骨骼机器人项目，犹他大学的雅克布森称之为XOS。XOS的控制原理类似于飞机的线性传导控制，使穿戴者可以轻松连续500次举起放下90kg的杠铃。2000年获得美国DARPA的1000万美元赞助。

在2000年，DARPA启动了“增强人体机能的外骨骼”^[1]项目研制招标书，橡树岭国家实验室、加州大学伯克利分校

以及SARCOS获得该项目的初期研制工作。2004年，伯克利研究出了BLEEX系统，发布了人体行走动作充电的方案，电源可维持20小时，最大负载可达45kg，在最大负载时，穿戴者的氧气消耗量比自力负担同样质量要少15%。

2005年，SARCOS公司在众多项目中脱颖而出，同年，美国洛克希德·马丁公司对加州大学伯克利分校的第二代BLEEX系统，进行了重新设计并试制了演示样机，改称为Human Universal Load Carrier (HULC)^[2]。

2009年2月26日，洛克希德·马丁公司正式发布了HULC系统，它的重量只有24kg，由钛金属制成，采用两块总重3.6kg的锂聚合物电池驱动，一次充满电可保证穿戴者以4.8km/h的速度背负90kg重物持续行进一个小时，最高速度则可达到16km/h。2009年10月27日，俄国防部第3中央研究所所长弗拉基米尔·博伊科宣布将斥资3500万美元在2015年前开发出“勇士-21”可穿戴式外骨骼，装备这套系统后步兵满负荷行进时速度可达到16千米/小时。

雷神公司在其位于美国犹他州盐湖城的研究机构内推出了XOS 2。XOS 2比第一代外骨骼重量更轻、速度更快、能力更强，同时其耗电量降低了50%，并利用高压液压驱动，分为作战型和后勤型两种型号，作战型只有腿部和腰部附件，后勤型增加了双臂助力。

1 外骨骼机器人最新技术一览

目前国内外对于外骨骼机器人及其相关技术的研究已经逐渐向产品化发展。在国际上,对于外骨骼的研究以美国和日本较早,相应的外骨骼系统和算法的研究也较为深入。国内在外骨骼领域的研究起步较晚,目前大多数的研究机构都处于试验研究阶段。

1.1 国外最新进展

为了使步态紊乱或失去行走能力的病人和老年人脱离轮椅独立行走,日本筑波大学的山海嘉之与Cybernetics实验室开展对外骨骼机器人系统HAL的研制,并于1999年完成了初代HAL的研发,即HAL-1(见图2)^[9]。HAL采用了角度传感器、肌电信号传感器和地面接触力传感器等传感设备来获得外骨骼和穿戴者的状态信息。HAL拥有混合控制系统,包括自动控制器进行诸如身体姿态的控制,以及基于生物力反馈和预测反馈的舒适助力控制器。随后Cybernetics实验室又完成了HAL-3和HAL-5的研制。HAL-5从外观上作了改进,并且考虑了其舒适性,使HAL系统开始从理论研究向日常应用发展。HAL-3是一套下肢外骨骼系统,能完成日常生活中的许多动作,如走路、上下楼梯等。HAL-3将相关电气控制设备均整合到了设计的背包中。

HAL-5(见图3)系统则是从实验室研究走向了现实应用,该系统从外形以及动力上均有所升级,通过关节和脚跟将部分重量传递到地面,提供的动力辅助足以补偿其本身的重量,且能够提供相应的动力,使穿戴者可以获得额外的负载能力。除此之外,HAL研究组又开展研制关于用于偏瘫患者康复训练的HAL单关节版本,于2009年完成研制工作。

加州大学伯克利分校相关研究机构于2004年成功研制了BLEEX——伯克利下肢外骨骼机器人(见图4)。BLEEX系统



图2 HAL-1 Type-B (1996-1999)

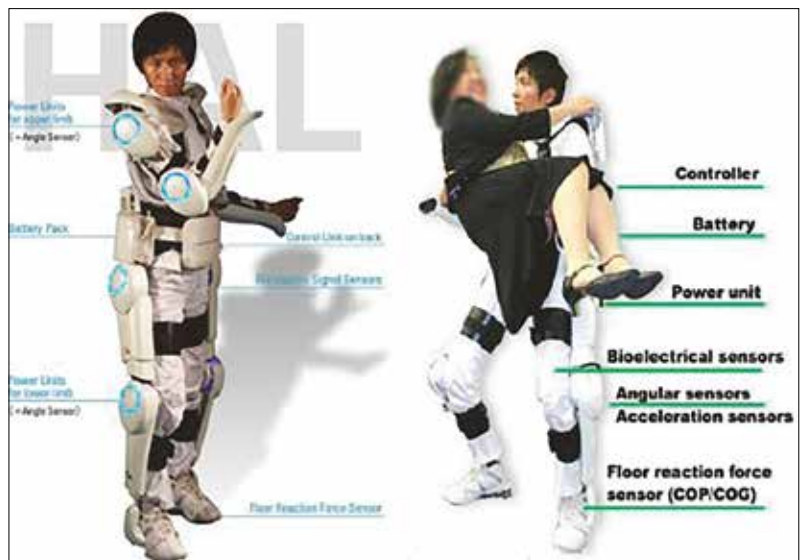


图3 HAL-5 Type-B

采用液压驱动，双下肢腿部各具有7个自由度，其中髋关节3个，膝关节1个，踝关节3个，另外在腰带中部增加1个自由度以调整人体下肢运动的协调。BLEEX系统可以携带34kg的负载，平均行进速度可以达到1.3m/s。

由加州大学伯克利分校同洛克西德·马丁公司联合研制并推向市场的第三代外骨骼系统HULC（见图5），其负载能力达到90kg，使其力量增强更大。同时耐力增强方面，也有了明显的提升，在负载36kg并以0.9m/s的速度行走时，可以减少15%的耐力消耗。HULC的最高速度可以达到4.4m/s。

以色列埃尔格医学技术公司于2012年研制出用于截瘫患者辅助行走的ReWalk外骨骼机器人（见图6），由著名工程师阿密特·戈夫尔主持研发。

ReWalk采用两连杆的电动腿部支架，每个关节都采用电机直接驱动的方式；在腿部支架上还装有采集人体信息的传感器，并传送至背包中的计算机控制器中。ReWalk能帮助腰部以下瘫痪的人完成站立、行走及上下楼梯等日常动作，用一副拐杖来维持身体平衡，并通过绑在手部的控制器来控制ReWalk完成指定动作。

除了以上所述，国外还有许多研究机构从事了外骨骼机器人及其相关的研究工作，如新加坡南洋理工的下肢外骨骼系统。日本神奈川工科大学的可穿戴助力外套，日本本田公司研发的可穿戴行走辅助工具，美国Yobotics公司研制的Robo Walker，以及美国Exso Bionics公司的下肢康复外骨骼机器人。

1.2 国内发展动态

国内对于外骨骼机器人的研究相对国外起步较晚，从事外骨骼机器人相关研究的主要研究机构中有中科院合肥智能机械所、浙江大学、哈尔滨工程大学、中国科技大学等，这些研究机构从下肢外骨骼的人体信息采集、机械结构、步态分析以及控制策略等方面进行了较为深入的研究。

中国科学院合肥智能机械所从2004年就开始了助老助残外骨骼机器人的研究，该外骨骼机器人系统的执行机构是通过直流电机配合行星减速器来实现，采用了多传感器数据融合技术来判断意图和实现控制（见图7）。

中科院的外骨骼助力机器人主控平台采用基于视窗的电脑实现，通过PCI总线与外骨骼机器人实现通信。该平台采用两种通



图4 BLEEX (Berkeley Lower Extremity Exoskeleton)



图5 HULC (Human Universal Load Carrier)

用的控制策略，分别为“关节对关节”的主从随动控制策略和基于人与外骨骼机器人之间的接触力作为输入进行的控制策略^[7]^[8]。

浙江大学相关研究所开展关于外骨骼机器人的研究也相对较早，分别研究了助力及康复两种应用的外骨骼机器人。其助力外骨骼机器人采用的执行机构为气缸驱动（见图8），传感系统主要由位置传感器、力传感器和视觉传感器等组成。该系统基于传感信息搭建三层控制环结构，对每层控制环路分别采用不同的方式来进行相应的反馈控制，尤其是在步态综合层使用了自适应模糊推理系统来建立非线性的步态控制^[9]。

浙江大学的康复外骨骼机器人则采用电机驱动，配合滚珠丝杠传动来带动关节运动，根据患者的健康状况可以选定三种控制方式，使患者根据控制方式的不同实现不同阶段的康复训练（见图9）^[10]。

2 AIDER下肢外骨骼系统

电子科技大学机器智能研究所于2011年开始着手研制用于下肢康复的助行外骨骼机器人系统（见图11）。于2015年9月完成了第一代产品样机AIDER，并且于2016年9月正式发布。

下肢助行外骨骼系统 AIDER 可用于帮助下肢瘫痪的脊髓损伤患者恢复部分行动能力，扩大运动范围，帮助截瘫病人重新融入生活，找回生活的信心。下肢助行外骨骼系统是典型的集生、机、电一体人工智能混合体，可以帮助患者完成起立、坐下、平地行走及上下楼梯等动作，摆脱了传统轮椅的束缚，同时提供步态康复等功能。

AIDER 主要由腰部盒子、大小腿关节连杆、智能鞋及拐杖组成，其中腰部盒子安装了AIDER 主控系统、电源管理系统及电池，大小腿关节均为主动关节，通过自主研发的电机驱动器控制电机提供驱动力，配备智能鞋可以采集患者穿戴过程中的脚底压力，并具备感知环境障碍功能。借助人工智能及其他核心技术，提供拟人化步态，辅以多传感融合自然交互功能，帮助患者重新站立起来，更舒适地完成起立、坐下、行走和上下楼梯等动作，扩大日常活动范围。



图6 ReWalk

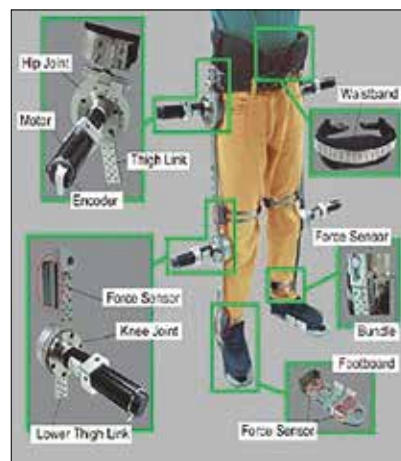


图7 合肥智能所的可穿戴外骨骼机器人



图8 浙江大学的助力外骨骼机器人系统

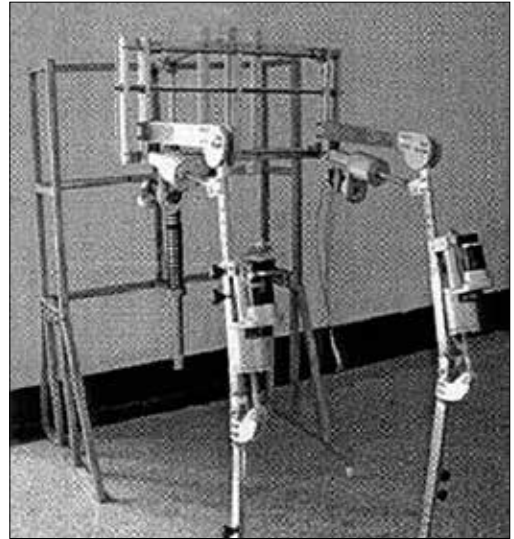


图9 浙江大学的康复外骨骼机器人系统



图10 电子科技大学助行外骨骼机器人系统AIDER

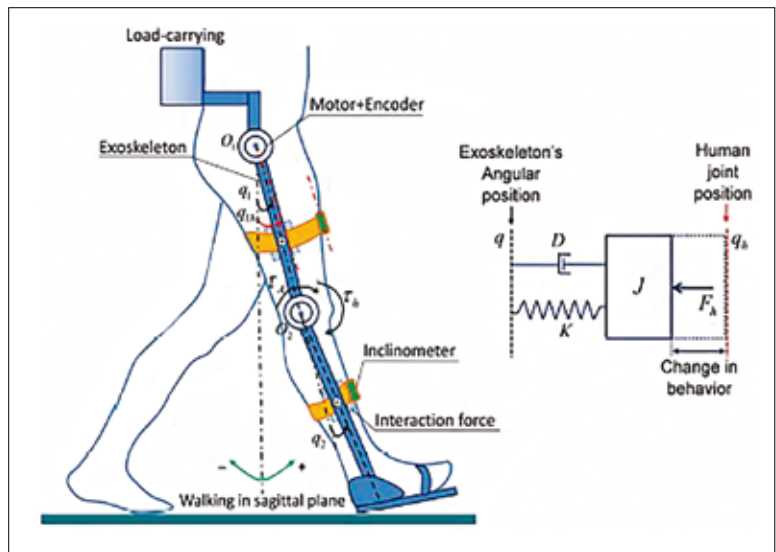


图11 加入惯性参数的弹簧阻尼模型

3 外骨骼机器人关键技术管窥

3.1 人机系统交互参数建模及适配

下肢外骨骼是一个可穿戴的紧耦合物理人机系统，在穿戴过程中与穿戴者的交互协调性，直接影响到穿戴者的穿戴体验。因此，对人机系统交互进行参数化建模和适配，是人机交互协调性的关键研究点。

在AIDER系统中，为了自适应不同穿戴者的人机系统交互模型，我们提出了外骨骼步态运动的自动人机适配技术，充分考虑了人体结构、多模态的异常步态特征信息，建立了基于人因工效学的外骨骼仿生自适应结构和改良的弹簧阻尼模型，实现了对多种人体和不同步态的自适应配置。

图11中描述的就是AIDER系统中的改良的弹簧阻尼模型。在改良的弹簧阻尼模型中，我们加入了惯性参数，如公式(1)所示：

$$\frac{\tau_{\text{imp}}(s)}{\Delta q(s)} = Js^2 + Ds + K \quad (1)$$

通过对人机系统交互进行参数化建模和适配，能够显著减少穿戴者在穿戴外骨骼运动过程中的交互力，提升穿戴者的穿戴体验。

3.2 多模人体运动意图识别感知及预测

外骨骼作为一个可穿戴设备，其运动目标总是需要跟随穿戴者的控制命令进行，所以在下肢外骨骼的研究中，如何对穿戴者的运动意图进行快速的感知和预测，是建立自然的人机交互界面的关键研究点。在已有的人体运动意图识别中，主要通过获取穿戴者的生理信号来进行运动意图识别，其中生理信号主要包括肌电信号和脑电信号等。

但是由于生理信号和穿戴者自身身体状况的局限性，光靠生理信号往往不能准确地对穿戴者的运动意图进行感知和预测。我们提出了基于EEG、

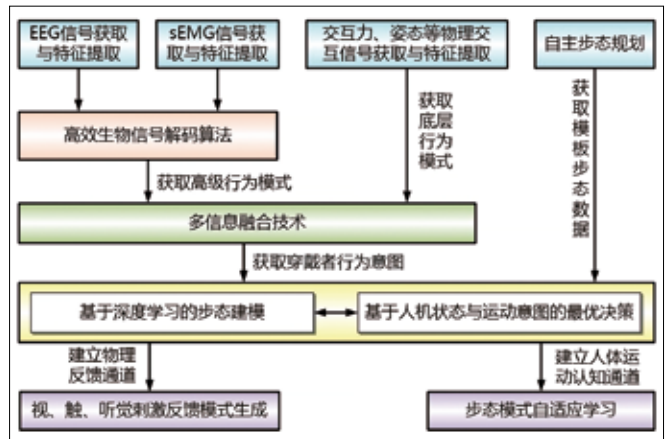


图12 多模人体运动意图识别感知及预测

EMG、交互力传感器和姿态传感器等生机结合的传感系统，实现生理信号和物理信号的多模融合，并结合视觉、听觉和触觉的反馈，建立完善的人机物理认知双向交互，对穿戴者的运动意图进行准确的识别感知和预测，见图12。

3.3 基于增强学习的智能步态规划和控制

在下肢外骨骼的算法设计中，步态规划和控制是达到预定运动和实现辅助行走或助力的关键因素。而作为一个紧耦合物理人机系统，如何实现智能的步态规划和控制来自适应不同的穿戴者和不同的环境，是下肢外骨骼步态规划和控制的关键研究点之一。

在AIDER外骨骼的步态规划和控制设计中，我们引入了一种层级交互式学习框架（如图13所示）。在层级交互式学习框架中，我们将步态规划层作为上层学习，控制器学习层作为下层学习，上层的学习结果则作为下层的学习目标，形成一个层级的学习框架。

在上层学习框架中我们通过动态运动基元（Dynamic Movement Primitives, DMP）对下肢外骨骼的步态进行建模，并利用局部加权回归

(Local Weighted Regression, LWR) 对DMP的模型参数进行在线学习和更新, 以适应不同的穿戴者和穿戴者的不同运动状态。而在下层控制器的学习中, 我们建立了一个基于模型的参数化控制器, 并通过增强学习 (Reinforcement Learning, RL) 的方法对控制器的参数进行在线学习, 以达到减少外骨骼和穿戴者之间的交互力, 并且使控制器能够适应不同的穿戴者和穿戴者的不同运动状态。

3.4 基于人因工效学的下肢外骨骼设计

外骨骼作为一个基于工效学设计的系统, 需要做到能够保证穿戴者的安全性、舒适性以及健康性。所以在外骨骼系统的研发与设计过程中, 以下几个因素是至关重要的: 1) 人体下肢生物力学的运动特点及功能, 特别是髋关节、膝关节和踝关节; 2) 物理人机交互界面; 3) 人机交互模式; 4) 能源、执行器以及执行系统的机制。总体来说, 就是既要保障外骨骼系统与人体的正确配合, 还要设计一个舒适的人机交互界面。

典型的人体下肢关节的自由度和运动范围见表1。

在下肢外骨骼机器人的设计中, 至少应该满足以下几个自由度的要求: 1) 盆骨自由度为3, 即矢状面、额状面及水平面转动; 2) 髋关节自由度为3, 包括屈/伸、收/展、外旋/内旋; 3) 膝关节屈自由度为1; 4) 踝关节屈/伸自由度为1; 5) 脚关节的跖趾关节自由度为1。

由于人体的关节十分复杂, 所以导致外骨骼的运动不能和人体关节的运动完全一致。过于简单的关节设计又会使运动一致性过低, 且导致不必要的人机交互力; 而过于复杂的外骨骼关节设计又会增加系统的复杂度, 降低人机交互过程中整个系统的稳定性和可靠性。除此之外, 人体的下肢结构决定了其是一个极其复杂的运动冗余系

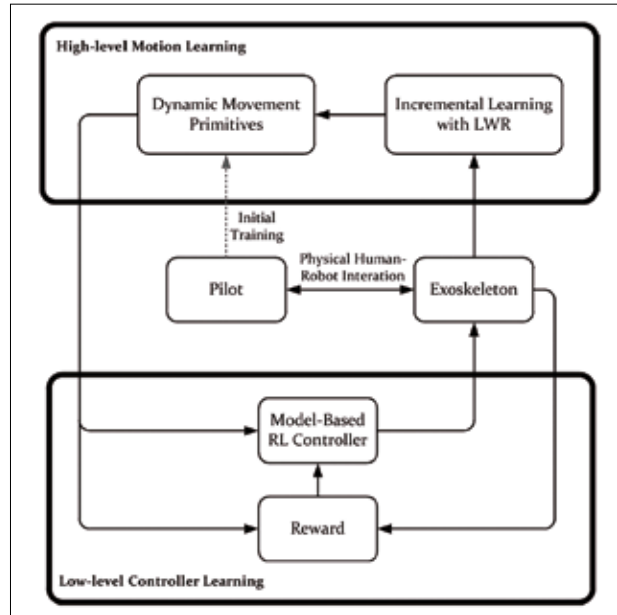


图13 层级交互式学习框架

表1 人体下肢运动生物力学属性

下肢关节	自由度	运动范围 (度)	扭矩 (Nm)
髋关节	3	140/15 (屈/伸)	140/20 (屈/伸)
		40/30-35 (收/展)	(走) 40-80
		15-30/60 (内旋/外旋)	(跑)
膝关节	2	120-140/0-10 (屈/伸)	50/140 (走) 125-273 (跑)
踝关节	4	40-50/20 (屈/伸) 30-35/15-20 (内旋/外旋)	165 (伸) (走) 180-240 (跑)

统,故而想要设计完全匹配人体下肢关节的外骨骼系统是不可能的。

在机械设计中,为了使外骨骼能够适应不同人体尺寸,用于非军用的外骨骼系统适用范围应该覆盖5%的女性至95%的男性。

4 一点展望

外骨骼机器人在国内外有广阔的发展前景。据目前国内外(包括电子科技大学)的研究现状,下肢外骨骼机器人多处于实验功能样机阶段,距离最终实际日常环境的应用还有一段距离,主要体现在紧耦合物理人机系统的交互协调性需要加强,多模人体运动意图识别感知能力需要提升,智能化运动步态规划能力需要增强,外骨骼本体机械设计的人体工效学体现需要强化等。随着高科技的快速发展,相信在不远的将来,在几个方面有一定建树,且下肢外骨骼服务、应用于社会的进程将会极大地加速。

参考文献

- [1] Kazerooni H, Racine H L, Huang L and Steger R. On the control of the Berkeley Lower Extremity Exoskeleton (BLEEX). International Conference on Robotics and Automation, 2005, 4353-4360.
- [2] Zoss A, Kazerooni H, Chu A. On the mechanical design of the Berkeley lower extremity exoskeleton (BLEEX). Intelligent Robots and Systems, 2005, 3465-3472.
- [3] Sankai Y. HAL: Hybrid assistive limb based on cybernetics. In: Proceedings of the International Symposium on Robotics Research. Hiroshima, Japan: 2007, 25-34.
- [4] Liu X P, Low K H. Development and preliminary study of the NTU lower extremity exoskeleton. Proceeding of IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent Systems, 2004, 1243-1247.
- [5] Pratt J E, B. Krupp T. Series elastic actuators for legged robots. The International Society for Optical Engineering, 2004, 29(3): 234-241.
- [6] Hutan A, Ara D and Thanos A. Autobionics: a new paradigm in regenerative medicine and surgery. Regenerative Medicine, 2010, 5(2): 279-288.
- [7] 陈峰. 可穿戴型助力机器人技术研究 [Ph. D. dissertation]. 中国科学技术大学, 2006.
- [8] 方郁. 可穿戴下肢助力机器人动力学建模及其控制研究 [Master dissertation]. 中国科学技术大学, 2009.
- [9] 牛彬. 可穿戴式下肢步行外骨骼控制机理研究与实现 [Master dissertation]. 浙江大学, 2006.
- [10] 张杰. 脑卒中瘫痪下肢外骨骼康复机器人的研究 [Master dissertation]. 浙江大学, 2007.