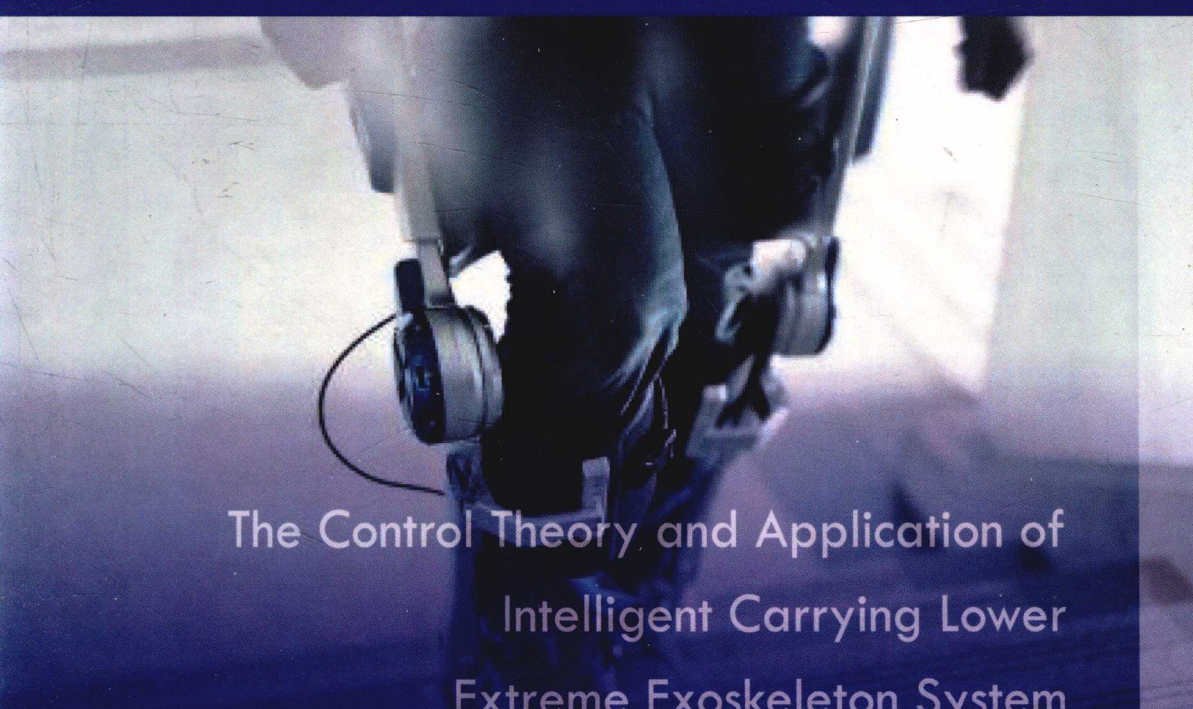


国防科技图书出版基金

下肢智能携行外骨骼 系统控制理论与技术

© 杨秀霞 赵国荣 梁勇 赵贺伟 著



The Control Theory and Application of
Intelligent Carrying Lower
Extreme Exoskeleton System



国防工业出版社
National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

下肢智能携行外骨骼系统 控制理论与技术

The Control Theory and Application of Intelligent
Carrying Lower Extreme Exoskeleton System

杨秀霞 赵国荣 梁 勇 赵贺伟 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

下肢智能携行外骨骼系统控制理论与技术/杨秀霞等著. —北京: 国防工业出版社, 2017.12

ISBN 978-7-118-11488-1

I. ①下… II. ①杨… III. ①仿生机器人—应用—步行
IV. ①TP242②G806

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 304089 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 13½ 字数 250 千字

2017 年 12 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—1000 册 定价 158.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777

发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755

发行业务: (010) 88540717

致读者

本书由中央军委装备发展部国防科技图书出版基金资助出版。

为了促进国防科技和武器装备发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。这是一项具有深远意义的创举。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在中央军委装备发展部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由中央军委装备发展部国防工业出版社出版发行。

国防科技和武器装备发展应取得了举世瞩目的成就,国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。开展好评审工作,使有限的基金发挥出巨大的效能,需要不断摸索、认真总结和及时改进,更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金

第七届评审委员会组成人员

主任委员 潘银喜

副主任委员 吴有生 傅兴男 赵伯桥

秘书长 赵伯桥

副秘书长 许西安 谢晓阳

委员 才鸿年 马伟明 王小谟 王群书

(按姓氏笔画排序) 甘茂治 甘晓华 卢秉恒 巩水利

刘泽金 孙秀冬 芮筱亭 李言荣

李德仁 李德毅 杨伟 肖志力

吴宏鑫 张文栋 张信威 陆军

陈良惠 房建成 赵万生 赵凤起

郭云飞 唐志共 陶西平 韩祖南

傅惠民 魏炳波

前 言

在军事变革迅猛发展的今天,单兵已经成为未来信息化战争中最基本、最重要的作战平台。各国在发展单兵综合作战系统、提高单兵作战能力的同时,虽然考虑了尽量减小单兵武器和负荷的体积和重量,但是由于各种因素的影响,事实上还是不可避免地提高了单兵的负荷量。

下肢智能携行外骨骼系统的出现是运载方式上的革新,它突破了传统车辆等运载工具容易受到地形条件影响的限制。在崎岖的山地、茂密的丛林等不适合机动车辆行进的地域,外骨骼系统能够帮助士兵背负沉重的武器装备。由于它能够明显减轻穿戴者的负重感,可以节省穿戴者的体力,因而可以有效地提高士兵的机动性和持续作战能力。

下肢智能携行外骨骼系统还可以应用于民用领域,如运动康复领域、不能使用大型机械的搬运领域、抢险救灾以及残疾人运动领域。

人-外骨骼服组成的智能携行系统属于典型的人机一体化系统,其需要外骨骼系统和操作者之间的协调运动,而只有给出一套成功的外骨骼系统设计及控制方案,才能保证它能与操作者始终保持协调一致的运动节奏,以使二者之间的互相干涉作用最小,并可以根据人的运动意图来适时提供助力。保证人穿戴后,运动负担减小,即穿戴外骨骼服后行走同样距离的路程,人体所消耗的能量比没有穿戴外骨骼服时所消耗的能量少。

国外在携行系统方面的研究已经持续了 40 多年,而我国仅在 2004 年后才有少数单位涉足,与国际研究水平存在较大差距,因此,尽快开展携行系统的研究,开发我国自主的携行系统产品已经迫在眉睫,其研究对缩短国内外差距、有效提高我军单兵战斗力具有重要意义。

项目组所在的海军航空工程学院研究团队致力于下肢携行外骨骼技术的研究,从 2004 年开始,历经十年的发展,在下肢携行外骨骼系统的设计、驱动、控制等关键技术方面均具有了良好的理论和实验基础,试制了三代外骨骼系统的演示样机,已能完成电动式外骨骼服的携行功能,初步形成了一个研究框架,课题组通过原理样机的研制,增进了对下肢智能携行外骨骼控制机理的认识与实践。

本书的主要内容如下。

首先介绍了下肢智能携行外骨骼系统及其特殊的控制问题,给出了国内外研究现状及系统设计和控制的关键问题。

针对下肢步行的运动机理和主要特征,从下肢关节的结构和运动特征、步态的测量和分析入手,通过步态实验分析人体下肢行走的运动学和动力学特征,为携行外骨骼系统的建模及控制提供了参考。

讨论了运用拉格朗日方程对下肢外骨骼动力学建模的方法,并进行了仿真,仿真结果验证了数学建模的有效性。给出了利用 ADAMS 和 SimMechanics 软件建立虚拟样机模型的方法,并建立了外骨骼系统的虚拟样机模型,为携行系统的控制及仿真奠定了良好的基础。

针对携行系统的特点及要求,对下肢外骨骼系统进行虚拟关节力矩控制的研究。虚拟关节力矩控制律不需要系统中人机之间力的作用点和力矩作用点,这为外骨骼服硬件设计提供了相当多的自由。考虑采用带误差反馈的改进的虚拟力矩控制,设计了基于快速 Terminal 滑模的虚拟力矩控制器对外骨骼服行走的摆动阶段进行控制,克服了虚拟力矩控制严重依赖于系统动态模型的缺点。同时设计了具有固定重力补偿的模糊自适应控制器对外骨骼服进行支撑阶段的位置控制,使系统具有鲁棒性。

运用下肢携行系统重复运动这一特性,设计了携行系统的迭代学习控制器。针对人体个体的差异,根据未加入学习控制阶段的人体行走步态判断出穿戴者的步态特征,结合人体行走的生物力学模型,对外骨骼服加入学习控制,设计了迭代学习控制器,提高了系统的控制速度及精度。

人机穿戴耦合方式研究。前面的控制方法虽然解决了人在系统中的控制问题,但是没有解决穿戴者与外骨骼服的匹配问题。根据造成系统产生不可控内力的因素,详细阐述了人服系统两链原理,定义了链接度的属性分配,计算得到了链接度的机动度递推限制条件和静定递推限制条件以及边界限制条件,利用空间维数的相关定理证明了所得结论的正确性。最后把该方法应用在实例中,并给出了外骨骼服构件的实现方式。

在理论研究的基础上,建立了携行外骨骼样机系统,设计了控制系统并对控制算法进行了实现,完成了携行承载功能,实现了多种运动形式。

感谢海军航空工程学院控制工程系的领导和同事们对本项事业的关心、指导与帮助。感谢顾文锦教授、王亭副教授、杨晓冬副教授、张远山博士、归丽华博士、杨智勇博士、刘建成硕士、陈占伏硕士、刘明辉硕士、朱宇光硕士、李双明硕士、武国胜硕士对本书的帮助。感谢为本书的出版做出贡献的人们。本书在编写过程中参考了国内外相关的文献,在此向有关著作者致以诚挚谢意!

非常感谢西北工业大学的郭建国教授、烟台大学的王培进教授、国防科技大学的马宏绪教授、华东理工大学的曹恒教授对本书提出的宝贵意见和建议。

本书工作是在国家自然科学基金项目(编号:60705030)、中国博士后科学基金(编号:20060400293)、山东省自然科学基金(编号:ZR2010FQ005)、总装预研基金(编号:9140A26020313JB14370)资助下开展的,在此一并表示感谢。

本书的出版得到了国防科技图书出版基金的资助。

下肢智能携行外骨骼系统的研究，是一个不断发展的重要研究方向。本书对携行系统的研究主要专注于对其控制机理及控制方法的研究，目前的携行外骨骼系统已能够实现基本的走、跑等功能，而作为全面、实用的系统，还有很多工作要做。希望更多的读者关注这个具有挑战性的研究领域，使相关问题得到进一步研究和解决。限于作者的学识水平，本书一定还存在不少缺点和错漏，恳请读者不吝指教。

作者
2017年10月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 下肢携行外骨骼系统研究的背景与意义	1
1.2 下肢携行外骨骼系统发展现状	2
1.3 下肢携行外骨骼系统设计及控制的关键技术及发展现状	9
1.4 本书的主要内容	15
第 2 章 基于携行外骨骼系统的人体负荷行走建模与实验	17
2.1 人体下肢关节结构及运动步态分析	18
2.1.1 人体的基本面和基本轴	18
2.1.2 下肢步行运动机理	19
2.1.3 下肢关节结构及运动	20
2.1.4 步态特征	21
2.2 人体下肢负荷行走的动力学建模	22
2.2.1 人体模型的简化	23
2.2.2 关节中心和环节重心的计算	23
2.2.3 环节的角运动	28
2.2.4 关节动力学	31
2.3 人体负荷行走的步态实验	35
2.4 人体负荷行走的运动学方程及动力学分析	42
2.4.1 运动学分析	43
2.4.2 动力学分析	53
2.4.3 速度和负荷对步态参数的影响	57
2.4.4 人体行走生物力学在外骨骼系统中的应用	62
2.5 小结	63
第 3 章 下肢智能携行外骨骼系统模型建立	64
3.1 下肢智能携行外骨骼系统的基本描述	64
3.1.1 外骨骼系统的环节属性	64
3.1.2 坐标系定义	65
3.1.3 模态的划分	66
3.2 外骨骼系统的运动学模型	68

3.2.1	刚体的位姿描述	68
3.2.2	运动学模型	70
3.3	外骨骼系统的动力学模型	75
3.3.1	动力学建模方法	75
3.3.2	动力学数学模型建立	76
3.3.3	动力学模型仿真及分析	83
3.3.4	模型特性	85
3.4	ADAMS 中虚拟样机模型的建立及仿真	85
3.4.1	基于 ADAMS 模型的下肢携行外骨骼系统稳定性分析及仿真	87
3.4.2	外骨骼 ZMP 稳定性	87
3.4.3	虚拟样机模型的仿真及分析	90
3.5	人机外骨骼系统的虚拟样机建模与仿真研究	95
3.5.1	九连杆虚拟人体简化模型仿真分析	95
3.5.2	虚拟人体模型的建立及仿真分析	96
3.5.3	人机外骨骼系统模型建立及仿真	105
3.6	SimMechanics 中虚拟样机模型的建立及仿真	108
3.7	小结	110
第 4 章	下肢智能携行外骨骼系统全过程运动控制	111
4.1	摆动阶段的虚拟关节力矩控制	111
4.1.1	单自由度连杆的虚拟力矩控制实现	113
4.1.2	基于快速终端滑模的鲁棒控制器设计	115
4.1.3	基于神经网络的骨骼服动态模型辨识	119
4.1.4	外骨骼服的虚拟力矩控制的实现	121
4.2	支撑阶段控制的位置控制	124
4.2.1	支撑阶段位置控制	124
4.2.2	基于固定重力补偿的位置控制	127
4.2.3	基于固定重力补偿的模糊自适应位置控制	128
4.2.4	外骨骼服位置控制实现	131
4.3	状态转移控制	136
4.4	行走模态预测	136
4.5	小结	140
第 5 章	外骨骼服迭代学习控制方法研究	141
5.1	外骨骼服迭代学习控制	141
5.1.1	外骨骼服迭代学习控制器设计	141
5.1.2	外骨骼服迭代学习控制收敛性	142
5.2	迭代学习控制器的实现	150

5.3	小结	152
第 6 章	基于静定结构的人机穿戴耦合方式	153
6.1	不可控内力的产生因素	153
6.1.1	关节匹配误差因素	153
6.1.2	超静定结构因素	155
6.2	人服系统两链原理	155
6.2.1	两链原理	155
6.2.2	链接度的属性	156
6.2.3	互联件的设计要求	157
6.2.4	链接度的计算	158
6.3	链接度限制条件的证明	161
6.3.1	静定平衡条件	161
6.3.2	空间维数条件	162
6.3.3	链接度限制条件的推导	163
6.4	穿戴耦合方式的实现	165
6.4.1	应用分析	165
6.4.2	外骨骼服构件的实现	167
6.5	小结	168
第 7 章	外骨骼控制系统样机设计及实现	170
7.1	外骨骼服第一代样机的设计与实现	171
7.1.1	系统组成	171
7.1.2	工作原理	172
7.1.3	性能指标	176
7.2	外骨骼服第二代样机的设计与实现	176
7.2.1	系统组成	176
7.2.2	工作原理	178
7.2.3	电机输出转矩的确定	178
7.2.4	拉索式电机驱动结构	181
7.2.5	性能指标	182
7.3	外骨骼服第三代样机的设计与实现	183
7.3.1	样机的改进	183
7.3.2	腰环与背架连接方式及受力分析	185
7.3.3	样机实验	186
7.3.4	性能指标	189
7.4	小结	190
	参考文献	192

Contents

Chapter 1	Introduction	1
1.1	The background and significance of carrying lower extreme exoskeleton system	1
1.2	The development of carrying lower extreme exoskeleton system	2
1.3	The development of key control technology and design of carrying lower extreme exoskeleton system	9
1.4	The main content of the book	15
Chapter 2	The modeling and experiment of human load walking based on the carrying lower extreme exoskeleton system	17
2.1	The joint structure and the gait analysis of lower extreme	18
2.1.1	The fundamental plane and the fundamental axis	18
2.1.2	The movement mechanics of lower exetreme walking	19
2.1.3	The lower exetreme joint structure and the movement	20
2.1.4	Gait characteristic	21
2.2	The dynamic model of lower extreme load carrying	22
2.2.1	The simplification of body model	23
2.2.2	The calculation of joint center and the segment gravity center	23
2.2.3	The angular motion of the segment	28
2.2.4	The dynamics of the joint	31
2.3	The gait experiment of human load walking	35
2.4	The kinematic equations and dynamic analysis of human load walking	42
2.4.1	The kinematic analysis	43
2.4.2	The dynamical analysis	53
2.4.3	The influence of speed and load on the gait parameters	57
2.4.4	The apply of human walking biomechanics in extreme exoskeleton system	62
2.5	The summary	63
Chapter 3	The model build of intelligent carrying lower extreme exoskeleton system	64
3.1	The basic description of intelligent carrying lower extreme exoskeleton system	64

3.1.1	The link attribute of exoskeleton	64
3.1.2	The definition of coordinate system	65
3.1.3	The division of modes	66
3.2	The kinematics model of extreme exoskeleton system	68
3.2.1	The pose description of rigid body	68
3.2.2	The kinematics model	70
3.3	The dynamical model of extreme exoskeleton system	75
3.3.1	The dynamic modeling method	75
3.3.2	The dynamical model build	76
3.3.3	The simulation and analysis of dynamical model	83
3.3.4	The characteristics of model	85
3.4	The modeling process and analysis of virtual prototype model in ADAMS environment	85
3.4.1	The stability simulation and analysis of carrying lower extreme exoskeleton system based on the ADAMS model	87
3.4.2	The ZMP stability of extreme exoskeleton system	87
3.4.3	The analysis simulation and modeling process of virtual prototype model	90
3.5	The study on simulation and analysis of virtual man-machine extreme exoskeleton model	95
3.5.1	The simulation of virtual nine-connecting-rod simplified body model	95
3.5.2	The modeling process of virtual simplified body model	96
3.5.3	The modeling process and simulation of man-machine extreme exoskeleton system	105
3.6	The modeling process and simulation of virtual prototype model in SimMechanics environment	108
3.7	The summary of the chapter	110
Chapter 4	The study on the whole process motion control of intelligent carrying lower extreme exoskeleton system	111
4.1	The virtual joint torque control during swing stage	111
4.1.1	The realization of single-free degree link' s virtual torque control	113
4.1.2	The design of robust controller based on the fast Terminal sliding formwork method	115
4.1.3	The extreme exoskeleton system' s dynamic model identification based on the neural network	119

4.1.4	The realization of extreme exoskeleton system's virtual joint torque control	121
4.2	The position control during supporting phase	124
4.2.1	The position control during supporting phase	124
4.2.2	The position control based on the fixed gravity compensation	127
4.2.3	The fuzzy adaptive position control based on the fixed gravity compensation	128
4.2.4	The realization of extreme exoskeleton suit's position control	131
4.3	The state transfer control	136
4.4	The prediction of walking gait	136
4.5	The summary of the chapter	140
Chapter 5	The study on iterative learning control of extreme exoskeleton suit	141
5.1	The iterative learning control of extreme exoskeleton suit	141
5.1.1	The design of extreme exoskeleton suit's iterative learning controller	141
5.1.2	The iterative learning control's astringency of extreme exoskeleton suit	142
5.2	The realization of iterative learning controller	150
5.3	The summary of the chapter	152
Chapter 6	The study on the man-machine coupled modes based on the still structure	153
6.1	The factors of uncontrollable force	153
6.1.1	The error component of joint matching	153
6.1.2	The statically indeterminate structure factor	155
6.2	The two-chain principle of man-machine system	155
6.2.1	The two-chain principle	155
6.2.2	The attribute of link degree	156
6.2.3	The design demands of interconnection	157
6.2.4	The calculation of link degree	158
6.3	The prove of link degree's restrictive condition	161
6.3.1	The static equilibrium condition	161
6.3.2	The dimension condition	162
6.3.3	The derivation of link degree's restrictive condition	163
6.4	The realization of wearing coupled modes	165
6.4.1	The apply analysis	165

6.4.2	The realization of extreme exoskeleton component	167
6.5	The summary of the chapter	168
Chapter 7	The design and realization of extreme exoskeleton controlling prototype model	170
7.1	The design and realization of 1 st extreme exoskeleton controlling prototype model	171
7.1.1	The system composition	171
7.1.2	The operational principle	172
7.1.3	The performance index	176
7.2	The design and realization of 2 nd extreme exoskeleton controlling prototype model	176
7.2.1	The system composition	176
7.2.2	The operational principle	178
7.2.3	The power output torque	178
7.2.4	The cable type motor drive structure	181
7.2.5	The performance index	182
7.3	The design and realization of 3 rd extreme exoskeleton controlling prototype model	183
7.3.1	The improvement of prototype	183
7.3.2	The OLM and force analysis between girdle ring and frame carrier	185
7.3.3	The experiment of the prototype	186
7.3.4	The performance index	189
7.4	The summary of the chapter	190
References		192

第1章 绪 论

1.1 下肢携行外骨骼系统研究的背景与意义

“单兵智能携行系统”是一种新概念携行承载下肢外骨骼系统，其将人的智能与机械腿的机器能量结合在一起。人作为整个系统的控制中枢，控制系统的行走方向和速度，可以完成人最擅长而机器却望其项背的那些任务；携行系统则承载人所背负的负荷，跟随人的运动^[1-5]。

在军事变革迅猛发展的今天，各国都在设法增强士兵的生存能力、降低伤亡率、提高观通能力和火力。作战外骨骼系统不仅自身具有能源供应装置，提供保护功能，而且可以集成大量的作战武器系统和现代化的通信系统、传感系统以及生命维持系统，从而把士兵从一个普通的战士武装成一个“超人”。

“单兵智能携行系统”主要应用于参与山地、丛林作战，或其他不适于车辆通行的地域，并且必须背负大量武器装备和补给品的士兵；该装具还可以应用于民用领域，比如运动康复领域、不能使用大型机械的搬运领域以及抢险救灾和残疾人运动领域。

区别于传统机器人，外骨骼系统在运动过程中，有一些特殊的要求。

(1) 外骨骼系统对操作者的形体、形态以及穿戴者的步速、步幅等要有较强的适应性，这样才能保证负重士兵的飞奔。

(2) 外骨骼系统应为自治系统，控制器为独立系统，不能依赖于外部计算及传感器量测。

(3) 外骨骼的控制系统设计应是鲁棒的，可靠的，应考虑到一些严峻的条件及情况。

外骨骼服系统独特的人机一体化控制及设计作为一个新型的控制问题，已引起了国外学者的广泛关注，国内学者在近几年开始对其进行研究。由于下肢智能携行外骨骼系统在军事上和民用领域的广泛及重要应用，而其好的控制策略能够极大地节约能源的消耗，最大限度地提高战斗力和利用价值，因此在我国开展外骨骼系统人机结合的智能控制，对于加快我军现代化及信息化建设，提高部队战斗力和节约能源都具有非常重要的意义。

国外相似的系统都称为“外骨骼”、“骨骼腿”、“骨骼服”或“外骨骼系统”，所以用上述名词时也表示携行系统。

1.2 下肢携行外骨骼系统发展现状

根据应用范围不同可以将下肢外骨骼系统分为两类：一类用于辅助老年人或残疾人行走；另一类是帮助携带大量负荷的人进行长距离的行走。

大多数设计出的外骨骼系统属于第一类。M.Vukobratvic 等于 1967 年就开始了对外骨骼和类似的运动康复矫正装置的研究，设计了一系列的外骨骼系统。他们开发了使用各种驱动装置驱动的外骨骼系统，如液压驱动、气压驱动或直流伺服电动机驱动等。这些系统验证了他们的理论结果，而且实验结果也证明了这种方法是可行的。但是这些装置最大的缺点就是过时的硬件设备和控制技术。

目前，最成功的用于辅助残疾人行走的外骨骼是日本筑波大学 Cybernics 实验室的科学家和工程师们研制出的世界上第一种商业外骨骼机器人 Hybrid Assistive Leg (HAL)^[6-11]，准确地说，是自动化机器人腿：“混合辅助腿”。如图 1-1 所示，这种装置能帮助残疾人以每小时 4 千米的速度行走，毫不费力地爬楼梯，HAL 机器腿的运动完全由使用者通过自动控制器来控制，不需要任何操纵台或外部控制设备。HAL 由背囊、内置计算机、电池、感应控制设备、4 个电动机传动驱动装置（对应分布在髋关节和膝关节两侧）组成。这种帮助人行走的外骨骼动力辅助系统，配备较多的传感器，如角辨向器、肌电传感器、地面传感器等，所有动力驱动、测量系统、计算机、无线网络和动力供应设备都装在背包中，电池挂在腰部，是一个可佩戴的混合控制系统，根据生理反馈和前馈原理研制的动力辅助控制器可以调整人的姿态，使其感到舒适。

HAL 采用肌电传感器来辨识人的运动意识，它考虑了人腿具有的黏性特性和弹性特性，基于阻抗控制方法研究了 HAL 的黏性特性的控制，对肌肉的黏弹性特性进行了深入的分析，使得穿上 HAL 的操作者运动起来感觉非常舒适。

HAL 的优缺点都体现在肌电传感器上。首先，人大脑中中枢神经发出运动信号，改变了人体表面肌肉电信号，这个电信号要超前于肌肉收缩或屈伸，因此，利用这个超前可以使控制器有充足的时间来对肌电信号进行处理并计算控制输出信号，抵消了控制系统中存在的延迟。这是其有利的方面。其次，肌电传感器由于使用肌电贴片贴于人体肌肉上面，受到很多因素的影响：①在激烈运动下，容易脱落、易位；②长时间运动后，人体出汗会影响传感器的测量；③传