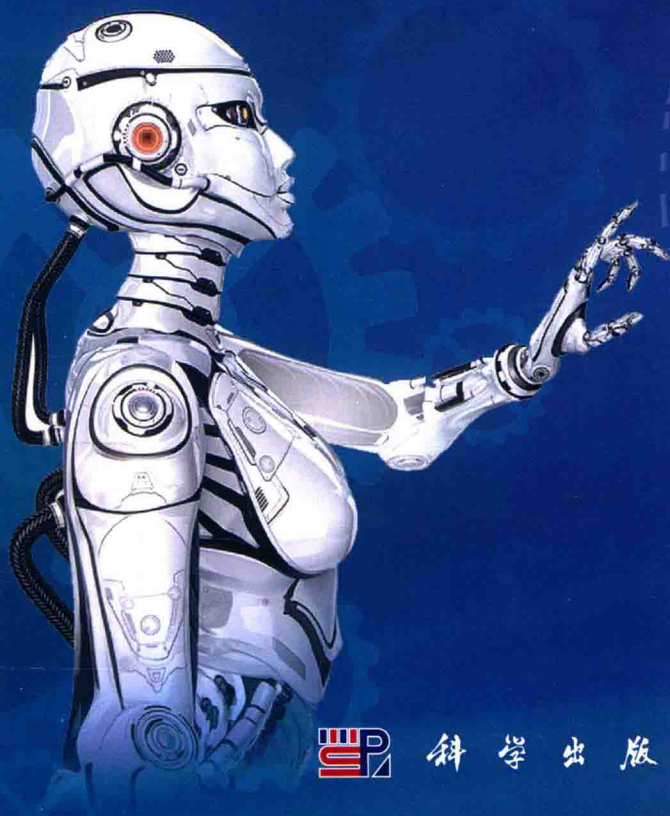


动态行走双足机器人的 稳定性分析与控制

刘丽梅 田彦涛 著



科学出版社

本书获吉林财经大学资助出版

动态行走双足机器人的 稳定性分析与控制

刘丽梅 田彦涛 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是作者参与完成国家高技术研究发展计划(“863”计划)课题、国家自然科学基金项目、吉林省教育厅科学研究规划项目研究成果的系统总结。书中系统介绍了被动动态行走双足机器人的稳定性分析的基本原理和稳定行走控制策略的主要技术,主要包括:被动动态行走双足机器人的发展绪论;被动动态行走双足机器人相关理论基础;被动动态行走双足机器人的稳定性分析;被动动态行走双足机器人的混沌步态与控制;被动动态行走双足机器人大范围稳定行走控制策略的研究;被动动态行走双足机器人的速度控制研究;被动动态行走双足机器人领域进一步需要研究的问题。

本书可供从事足式移动机器人和康复机器人研究的科研人员、相关专业的研究生或高年级本科学生使用。

图书在版编目(CIP)数据

动态行走双足机器人的稳定性分析与控制/刘丽梅,田彦涛著. —北京:科学出版社, 2017.6

ISBN 978-7-03-052975-6

I. ①动… II. ①刘… ②田… III. ①机器人-稳定性-分析 ②机器人-运动控制-研究 IV. TP242

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017) 第 118030 号

责任编辑: 胡庆家 / 责任校对: 邹慧卿
责任印制: 张 伟 / 封面设计: 蓝正设计

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京建宏印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 6 月第 一 版 开本: 720 × 1000 B5

2017 年 6 月第一次印刷 印张: 11 插页: 1

字数: 220 000

定价: 68.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

作者简介

刘丽梅，女，1979 年出生，工学博士。吉林财经大学应用数学学院副教授。主要从事复杂系统的建模、优化与控制，仿生与智能机器人系统控制等学科方向的基础研究与应用研究。近年来在国内外著名期刊上发表学术论文 15 篇，其中被 SCI, EI 收录检索 9 篇。获吉林省自然科学学术成果奖二等奖、校优秀科研成果奖一等奖。主持完成吉林省教育厅“十二五”科学技术研究项目 1 项、长春市哲学社会科学规划项目 1 项、校级项目 1 项。参加完成国家自然科学基金项目 3 项、国家高技术研究发展计划(“863”计划)项目 1 项、教育部青年项目 1 项、省级项目 4 项、厅级项目 6 项。

田彦涛，男，1958 年出生，工学博士。吉林大学通信工程学院教授。长期从事复杂系统建模与优化控制、仿生与智能机器人系统控制等学科方向的基础研究与应用研究。“十二五”期间，围绕动态步行机器人运动学机理与控制方法、复杂环境下群体机器人系统协同适应性、电动汽车主动安全系统及智能化技术、新型非共面多旋翼飞行机器人等课题开展研究工作。其中，承担的国家自然科学基金项目，在国内首次开发了动态双足步行机器人原型机，并开展了关键技术研究，在运动学机理与控制方面取得突破。在群体机器人与多智能体系统协同适应性、多自主车辆决策与控制、智能汽车主动避撞等方面进行了系统研究。与中国科学院长春光学精密机械与物理研究所合作承担中国科学院创新项目“新型多翼飞行机器人”，突破了新型非共面旋翼飞行机器人关键技术，提高了系统可靠性，增加了系统承载能力和续航时间。近五年，承担完成国家自然科学基金和国家重大科技成果转化项目 5 项、吉林省和教育部科技项目 4 项，发表学术论文 55 篇，其中，收入 SCI 检索 10 篇、EI 检索 38 篇，出版专著 1 部，申请并获得授权国家发明专利 10 项，获省部级科技进步奖三等奖 1 项。

前 言

双足步行机器人研究涉及仿生学、机械学、电子工程学、材料学、控制理论、人工智能、传感器等多个学科领域，是一个多学科融合交叉的综合学科。而且双足步行机器人系统是一个高阶、强非线性、变结构、强耦合的非线性系统，涉及力学、数学等多方面问题。因此，双足步行机器人研究具有重要的学术价值和实用价值，并且已经成为机器人领域最为活跃的一部分，它的研究意义主要体现在以下几个方面：

(1) 双足步行机器人具有与人类相近的行走方式，可在非结构性的复杂地面行走(如凹凸不平地面运动、上下楼梯、跨越障碍等)，也可代替人类在条件恶劣、危险的环境(如海底、太空、核环境)中工作。因此，与其他类型的机器人相比，双足步行机器人对行走环境具有较强的适应性，同时也拓展了人类的能力，扩大了人类的活动领域。

(2) 双足步行机器人研究为医疗康复设备和假肢等辅助行走机构的设计提供了有力的理论和技术支持，可以解决下肢残疾或截肢病人的康复问题。因此双足步行的运动机理在康复医疗、生物医学工程等领域具有广阔的应用前景。

(3) 双足步行机器人在外形上与人类相似，具有较高的动作灵活性，能够很好地融入人类的生活环境，可以用于娱乐业和公共服务业。

(4) 双足步行机构使得机器人系统是一个多变量、强非线性、非完整约束的复杂机械系统，在行走过程中具有欠驱动和不稳定特性，因此给双足步行机器人的研究带来了最具挑战性的研究难题：

首先，利用现有的数学模型和解析算法很难得到双足步行机器人动力学模型的精确数学表达式，因此给双足步行机器人的稳定性分析和动态行走控制策略的设计带来了困难。

其次，双足步行机器人的行走是单腿支撑相和双腿支撑相之间相互交替的过程。它既包含单足支撑时的欠驱动状态，又包含双足支撑时的冗余驱动状态。不同阶段控制器的变化，使系统的控制技术很难实现，因此对多模型系统的稳定控制和平滑切换控制带来了更多的难题。

经过各国研究学者的努力和探索，能够稳定行走的机器人项目在多个国家成功实现，如日本本田公司的 ASIMO 机器人、索尼的 QRIO 机器人。它们大部分采用大力矩、高刚度、高增益反馈的驱动系统。将双足行走的步态模型进行简化，基于零力矩点(zero moment point, ZMP)稳定准则进行单步态关节角轨迹规划，然

后利用轨迹跟踪控制方法对机器人关节进行轨迹跟踪控制来实现机器人的稳定行走。这类复杂的控制和驱动系统不仅使机器人能量效率比较低,而且使机器人步态不自然,不利于揭示人类行走的本质特征。

20 世纪 90 年代,McGeer 首次提出“被动动态行走”(passive dynamic walking)的概念,指的是机器人在不采用能量驱动和主动控制的情况下,利用自然力和自身的内在动力学特性,在重力作用下沿倾斜地面向下行走,获得了自然、高效、与人类相似的、具有周期性的稳定步态。这里的自然力指的是重力、机器人足与地面的摩擦力和碰撞力。而自身的内在动力学特性指的是包含一些如弹簧阻尼类的被动元件产生的动力。这种没有任何驱动和控制的被动动态行走称为“纯被动动态行走”。纯被动动态行走研究方法比传统的主动控制研究方法具有优势,它不仅使得机器人具有与人类行走相近的能量效率,而且具有自然的步态,受到了众多学者的关注。但是,由于纯被动动态行走没有驱动和控制系统,使得机器人的步态单一,只能在斜坡上向下行走,且灵敏度较低,因此具有明显的局限性。为了使双足步行机器人获得高速、高效、稳定的动态行走步态,在纯被动动态行走的基础上适当引入主动控制而组成的混合系统是解决这个问题的一個可能方案。因此本书在纯被动动态行走机器人研究的基础上,主要对被动动态行走双足机器人的稳定性分析和控制策略的设计进行了研究。具体的研究内容包括以下几个方面:

(1) 利用庞加莱映射法对带膝关节的双足步行机器人的被动动态行走步态进行了局部稳定性分析。由于带膝关节的双足被动动态行走机器人在一个行走步态周期内包含两个摆动阶段和两个碰撞切换过程,因此庞加莱映射的建立和 Floquet 乘子的计算成为分析机器人局部稳定性的关键。为了解决这个难题,本书将多自由度带膝关节的双足被动动态行走机器人的动力学模型抽象为一类由连续型微分方程和离散型代数映射构成的脉冲混杂系统,利用线性化方法和扰动理论提出了计算脉冲混杂系统对应的庞加莱映射的雅可比矩阵的半解析法,进而得到 Floquet 乘子。并用半解析法计算出带膝关节的双足被动动态行走机器人的庞加莱映射的雅可比矩阵,研究了 Floquet 乘子随着斜面倾角、机器人结构参数变化的规律,得到了最优的斜面倾角范围和最优的机器人结构参数值。

(2) 提出了计算脉冲混杂系统极限环吸引域的方法,对带膝关节的双足被动动态行走机器人进行了全局稳定性分析。为了降低胞映射法的计算量,在胞映射法中引入庞加莱映射,提出了庞加莱型胞映射法,并用庞加莱型胞映射法计算出带膝关节的双足被动动态行走机器人步态极限环吸引域。为了既节省计算的时间,又保证计算的精度,本书在庞加莱型胞映射法的基础上提出了一种改进的方法——变胞胞映射-点映射法用于估计带膝关节的双足被动动态行走机器人步态极限环的吸引域。数值实验结果表明变胞胞映射-点映射法不但能够得到极限环的吸引域,而且能够获得庞加莱映射的不动点,消除了 Newton-Raphson (牛顿-拉普森) 迭代法在

初值选取上的随机性。同时利用变胞映射-点映射法研究了带膝关节的双足被动动态行走机器人结构参数变化对被动动态行走机器人全局稳定性的影响。

(3) 通过仿真分析了无量纲的斜面倾角、大小腿质量比、大小腿长度比影响被动行走机器人的倍周期步态和混沌步态出现的规律,得到了带膝关节的被动动态行走机器人的步态周期时间、支撑腿的初始状态等步态特征随斜面倾角的不断增大而出现的倍周期分岔和混沌现象的仿真结果。为了抑制混沌步态的出现或将混沌步态控制收敛到稳定的周期步态,本书基于延迟反馈控制思想和仿生学原理提出了自适应常值力矩和传感反馈相结合的仿生行走控制策略。该控制器结构简单,能效高,易于工程实践。并且以带膝关节的双足步行机器人为研究对象做了仿真实验,结果表明自适应常值力矩和传感反馈相结合的仿生行走控制不但能将混沌步态控制收敛到稳定的周期步态,而且具有较强的鲁棒性。

(4) 本书对如何扩大被动行走机器人的斜面倾角范围,使机器人在坡度变化的地面上保持稳定行走进行了控制研究。利用李雅普诺夫稳定性理论和鲁棒控制原理设计了有限时间鲁棒轨迹跟踪控制和变路况切换控制算法,并对控制系统的稳定性进行了证明。仿真实验结果表明,利用有限时间鲁棒轨迹跟踪控制和变路况切换控制器在给定的时间内通过一步即可实现不同坡度地面上被动行走步态的平滑切换,能量效率较高,且切换过程对外界扰动和模型误差等具有较强的鲁棒性。对比实验结果表明,变路况切换控制比基于能量的角度不变控制具有优势,能够更快地加速极限环的收敛速度,提高系统的稳定性。为了使机器人在平地、上坡、下坡时也能稳定行走,本书提出了基于被动行走原理的混合控制和大范围稳定行走控制策略,仿真实验验证了算法的有效性。

(5) 本书将带膝关节的双足步行机器人简化为倒立摆,利用简化的倒立摆模型分析出重力场参数与行走速度是成正比的关系,并提出了基于势能补偿的控制策略,扩大了机器人的行走速度范围。通过调节控制器中的重力场参数,使机器人能达到理想的行走速度,从而实现了高速行走。仿真结果验证了控制算法的有效性,它表明随着重力场参数的增大,机器人的行走速度会加快。同时对受控过程进行了能量分析,结果表明随着重力场参数的不断增大,带膝关节的双足步行机器人的机械能和动能也会随之变大,从而加快了机器人的行走速度。最后以速度变化后的稳定步态作为参考步态,设计了速度切换控制器,将机器人的平均行走速度控制收敛到目标值,使机器人能够变速行走。仿真结果表明,速度切换控制不但能实现不同速度间步态的平滑切换,而且切换过程对外界扰动具有鲁棒性。

(6) 最后,总结了全书所做的工作,提出了今后进一步需要研究的问题。

本书前言及第 1—6 章由刘丽梅著,“结束语”由田彦涛著。全书框架结构安排由田彦涛承担,统稿、定稿由刘丽梅承担。

本书的研究成果是作者参与完成国家高技术研究发展计划 (“863” 计划) 课

题 (欠驱动步行机器人运动学机理与控制方法研究, 编号: 2006AA04Z251)、国家自然科学基金项目 (欠驱动步行机器人高效稳定行走的步态优化与分域控制研究, 编号: 60974067)、吉林省教育厅“十二五”科学研究规划项目 (基于仿生学和被动行走原理的双足步行机器人稳定步态的控制研究, 编号: 20140201) 研究成果的系统总结。

刘振泽副教授、张佩杰博士、肖家栋硕士、宿建乐硕士、黄孝亮硕士、陈鸿帅硕士、李建飞硕士、姜鸿硕士、殷金龙硕士、朱振超硕士等, 与作者合作完成了有关研究课题, 对此深表谢意。

最后, 衷心感谢吉林财经大学学术著作出版基金对本书出版的资助。感谢科研处郭天宝处长和王丹老师, 以及应用数学学院李秀玲院长对我的热情鼓励和积极帮助。

限于作者水平, 书中肯定有许多缺点和不足, 恳请读者和相关专家指教!

刘丽梅

2017 年 1 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 被动动态行走双足机器人的研究现状	1
1.1.1 被动动态行走双足机器人的研究背景	1
1.1.2 被动动态行走双足机器人的发展现状	2
1.1.3 被动动态行走双足机器人的控制问题	7
1.1.4 被动动态行走双足机器人的稳定性分析	11
1.1.5 存在的主要问题	13
1.2 本书的主要内容与章节安排	14
1.2.1 研究目标及主要研究内容	14
1.2.2 科研项目资助情况	14
1.2.3 章节安排	14
参考文献	15
第 2 章 被动动态行走双足机器人的动力学建模	25
2.1 引言	25
2.2 无膝关节的双足步行机器人的动力学建模	26
2.2.1 模型描述	26
2.2.2 单腿支撑的摆动阶段的动力学建模	27
2.2.3 摆动腿与地瞬间碰撞切换模型	29
2.2.4 无膝关节双足步行机器人行走步态的脉冲混杂模型	31
2.2.5 无膝关节的双足步行机器人被动动态行走步态的仿真研究	33
2.3 带膝关节的双足步行机器人的动力学建模	36
2.3.1 模型描述	36
2.3.2 步态描述	37
2.3.3 带膝关节的双足步行机器人的动力学具体模型	39
2.3.4 带膝关节的双足步行机器人行走步态的脉冲混杂模型	47
2.3.5 带膝关节的双足步行机器人行走步态的仿真研究	48
2.4 本章小结	52
参考文献	52

第 3 章 被动动态行走机器人的稳定性分析	54
3.1 引言	54
3.2 被动动态行走机器人的局部稳定性分析	55
3.2.1 周期步态轨道稳定性定义	55
3.2.2 庞加莱映射法	56
3.2.3 利用庞加莱映射法研究双足被动动态行走机器人行走步态的局部稳定性	59
3.3 被动动态行走机器人的全局稳定性分析	69
3.3.1 胞映射原理与基本概念	69
3.3.2 庞加莱型胞映射法	70
3.3.3 变胞胞映射-点映射法	72
3.3.4 数值实验	74
3.4 本章小结	78
参考文献	79
第 4 章 被动动态行走机器人的混沌步态与控制	81
4.1 引言	81
4.2 混沌运动与混沌控制	82
4.2.1 混沌的定义及特点	82
4.2.2 混沌的判别方法	82
4.2.3 混沌控制的主要方法	83
4.3 被动动态行走机器人的倍周期步态与混沌步态	84
4.3.1 被动动态行走机器人动力学方程的无量纲化	84
4.3.2 带膝关节的双足机器人被动动态行走步态的倍周期现象	85
4.3.3 倍周期步态与混沌步态的出现与参数的关系	87
4.4 被动动态行走混沌步态的控制策略研究	89
4.4.1 延迟反馈控制思想	89
4.4.2 控制器设计的仿生学依据	89
4.4.3 自适应常值驱动与传感反馈结合的仿生行走控制	90
4.4.4 仿真实验	92
4.5 本章小结	95
参考文献	96
第 5 章 被动动态行走机器人大范围稳定行走控制策略的研究	98
5.1 引言	98
5.2 双足被动动态行走机器人的控制策略	99
5.2.1 角度不变控制	99
5.2.2 基于能量的角度不变控制	101

5.3 有限时间鲁棒轨迹跟踪控制	103
5.3.1 最小能耗参考轨迹的生成	104
5.3.2 最小能耗参考轨迹的数值实验	105
5.3.3 有限时间鲁棒轨迹跟踪控制器	107
5.3.4 有限时间鲁棒轨迹跟踪控制的仿真实验	112
5.4 变路况切换控制	115
5.4.1 控制器设计	115
5.4.2 仿真结果	118
5.5 基于被动动态行走原理的混合控制	124
5.6 大范围稳定行走控制	127
5.6.1 模型描述	127
5.6.2 控制算法	129
5.6.3 稳定性证明	129
5.6.4 仿真实验	130
5.7 本章小结	133
参考文献	134
第 6 章 被动动态行走机器人速度控制研究	137
6.1 引言	137
6.2 重力场参数与步行速度的关系	138
6.3 基于势能补偿的速度控制	140
6.3.1 控制器设计	140
6.3.2 受控过程的能量分析	142
6.4 速度切换控制	143
6.4.1 控制器设计	143
6.4.2 仿真实验	148
6.5 本章小结	151
参考文献	152
结束语	154
索引	157
彩图	

第1章 绪 论

1.1 被动动态行走双足机器人的研究现状

1.1.1 被动动态行走双足机器人的研究背景

主动驱动(全驱动)双足步行机器人依据零力矩点(zero moment point, ZMP)稳定性准则进行复杂的轨迹规划,通过大力矩、高增益反馈的驱动控制系统进行精确的轨迹跟踪,实现了稳定的动态行走。复杂的控制和驱动系统使机器人步态不够自然,能量效率低,因此不利于揭示双足行走的本质特性。而且人类在行走时不需要对步态进行规划,人类的神经-肌肉-骨骼驱动控制系统也不具备大力矩、高精度和高响应频率特性^[1]。因此,需要一种能够充分挖掘双足步行本质的研究思路,而研究被动动态行走恰好能够充分的挖掘人类行走的本质特征。

20世纪90年代,McGeer首次提出“被动动态行走”的概念,是指在不采用能量驱动和主动控制的情况下,利用机器人的内在动力学特性,在重力作用下沿倾斜地面向下行走,获得了自然、高效、与人类相似的稳定步态。这种没有任何驱动和控制的被动动态行走称为“纯被动动态行走”。由于纯被动动态行走没有驱动和控制系统,使得机器人的步态单一,只能在斜坡上向下行走,且灵敏度较低,因此具有明显的局限性^[2,3]。实际上,人们更希望双足步行机器人可以根据实际工况信息,通过适当的控制输入实现高效、自然、部分可控的稳定的动态行走。而在纯被动动态行走的基础上适当引入主动控制而组成的混合系统是解决这个问题的一個可能方案,于是产生了半被动动态行走的概念。2005年,世界著名学术期刊*Science*连续刊登了三篇关于被动动态行走的文章,引起了科研人员对被动动态行走机器人的关注^[4-6]。许多科学研究人员开始投入到半被动动态行走双足机器人的研究中。半被动动态行走机器人又称可控被动行走机器人,是指机器人存在被动关节,仅在部分自由度施加驱动,对步行过程中的能耗进行补偿,实现在平地、上坡和下坡的动态行走。半被动动态行走机器人一般不采用大力矩的驱动器,控制结构简单,能量效率高,且充分利用了机器人自身固有的特性,因此能够得到高能效、自然的步态,且步态明显类似于人的步态。以双足步行的被动特性为切入点,分析和挖掘双足行走的本质特性,并利用机器人自身的动力学特性设计控制策略,具有重要的理论与现实应用价值。

1.1.2 被动动态行走双足机器人的发展现状

McGeer 最早设计了无膝关节 2D 被动动态行走机构^[7], 如图 1.1(a) 所示。该机构无驱动和控制系统, 仅依靠重力和自身惯性的作用就能沿斜坡向下稳定行走。这个机器人只有髋关节 1 个自由度, 采用内外成对的腿来保证侧向平衡。之后, McGeer 又研制了带膝关节的被动动态行走机构^[8], 如图 1.1(b) 所示。以上述机构为对象, McGeer 率先提出了被动动态行走的基本理论和研究方法, 对模型的建立和求解, 以及步态解的分析都进行了系统的研究。其后, 国外的多所大学和科研机构也研制了被动动态行走机构, 机构复杂度逐渐加大。例如, Collins 在 McGeer 研究的基础上设计了带膝关节的 3D 被动动态行走机器人^[9], 如图 1.1(c)。被动动态行走机构只能在斜面上靠重力驱动向下行走, 由于没有驱动关节, 机器人不可控, 因此它的实用价值受到很大的限制。

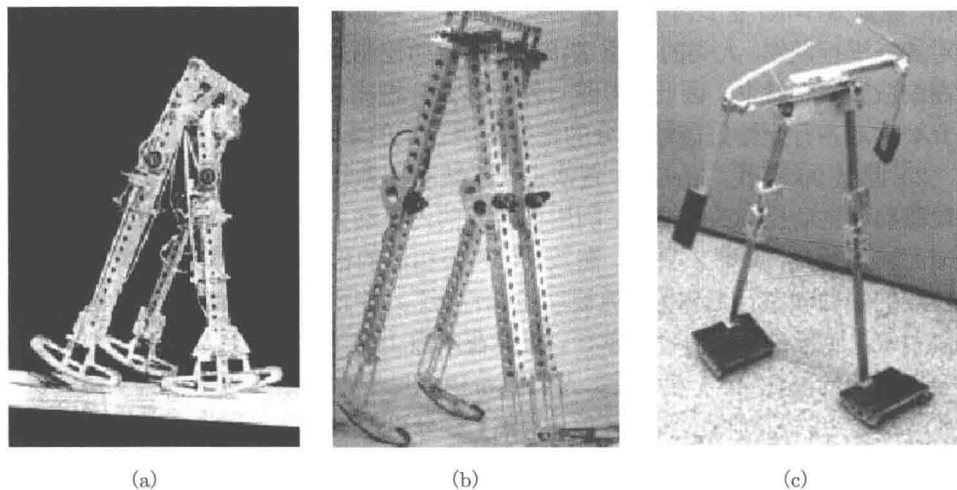


图 1.1 被动行走机器人的早期模型

半被动动态行走机器人是介于纯被动动态行走机器人与主动驱动机器人之间的一种机器人机构, 通过施加驱动和控制系统实现动态行走。荷兰代尔夫特大学在被动动态行走机构设计方面最具代表性。M.Wisse^[10,11] 研制的半被动动态行走机构, 复杂度逐渐增大, 如 Mike, Max, Meta。半被动动态行走机器人 Mike(2002 年)^[12] 在双腿膝关节和踝关节具有自由度, 如图 1.2 所示。机器人通过在髋关节施加驱动控制实现了稳定行走。Max^[13] (2003 年) 是 2D 行走机器人样机, 上躯体采用联动机构使其总处于两腿的角平分线上, 通过气动人工肌肉实现了稳定行走, 如图 1.3 所示。Meta^[14] (2005 年) 采用了与 Max 相同的机械结构设计, 它有 5 个自由度, 其中在 2 个踝关节和 1 个髋关节处施加伺服电机驱动, 实现稳定行走, 如

图 1.4 所示。Flame^[15] (2007 年) 是目前最先进的双足 3D 半被动动态行走的机器人样机, 重 15kg, 高 1.3m, 带有侧向自由度, 如图 1.5 所示。通过控制摆动脚在侧向平面的位置提高步态的稳定性, 实现 3D 动态行走。Leo^[15] (2009 年) 是该科研机构最新研究成果, 具有 7 个自由度, 每条腿各三个自由度, 上身手臂各一个自由度, 通过伺服电机进行驱动, 如图 1.6 所示。利用横杆保持机器人行走时的侧向平衡, 并向机器人输送电力。机器人能够实现完全自主行走, 且在摔倒时能依靠自主控制站立起来。

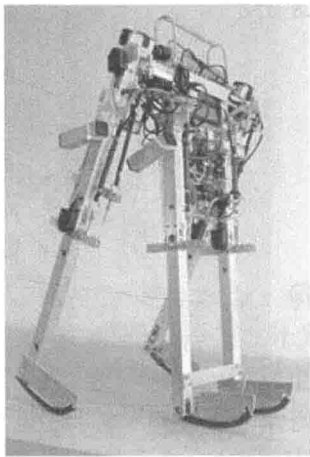


图 1.2 Mike

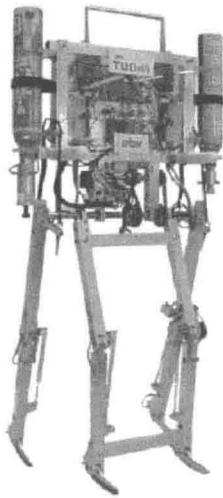


图 1.3 Max

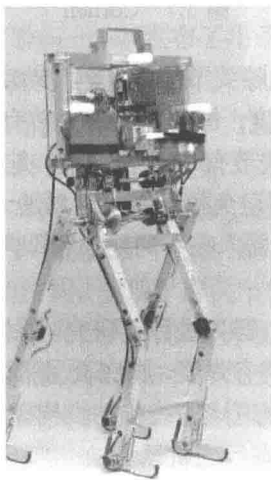


图 1.4 Meta

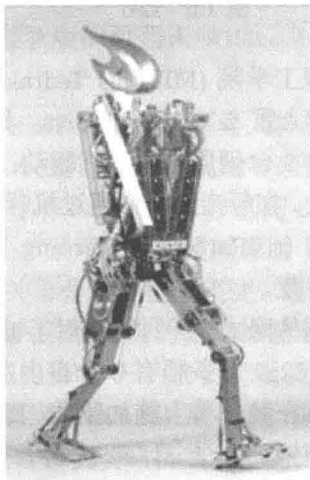


图 1.5 Flame

美国康奈尔大学研制的半被动动态行走机器人^[16]有 5 个自由度, 其中 1 个髋关节自由度和 2 个膝关节自由度均无驱动, 只在 2 个踝关节施加由弹簧和电机组成的驱动系统, 如图 1.7 所示。联动机构使机器人的上躯体总处于两条腿的角平分线上, 且机械结构使得机器人的双臂与对应腿的运动相关联。踝关节处的弹簧起着弹性储能器件的作用。当摆动腿落地时, 通过弹簧的释放为机器人行走补充能量, 同时将质心的速度方向改变到下一个步态的初始值, 使连续稳定行走成为可能。目前行走时间最长的半被动动态行走机器人 Ranger^[17]也是由康奈尔大学研制的。该机器人具有四条腿, 无膝关节, 脚设计为圆弧形。在机器人的髋关节和踝关节施加驱动, 避免了摆动腿的“擦地”现象, 如图 1.8 所示。

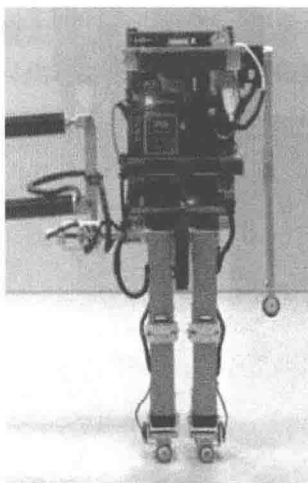


图 1.6 Leo

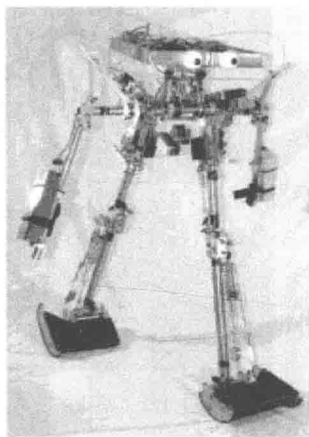


图 1.7 Cornell

麻省理工学院 (MIT) 的 Tedrake^[18] 研制了无膝关节的 3D 半被动动态行走机器人。机器人重 2.75kg, 高 43cm, 具有 6 个自由度, 每条腿的踝关节有 2 个自由度, 分别由 2 台伺服电机进行驱动; 每条腿的髋关节有 1 个自由度, 是被动关节, 此处无驱动。在行走过程中通过机器人的左右摇摆避免摆动腿提前触地, 并利用基于再励学习 (reinforcement learning, RL) 方法使机器人在不同地形和不同坡度的路面上稳定行走。

卡耐基梅隆大学^[19,20]也对半被动动态行走机器人进行了研究。机器人 R1 高 0.5m, 重 5.8kg, 每条腿有 3 个自由度, 踝关节安装有弹簧, 脚底板呈平面形状, 利用直流电机在髋关节上施加驱动, 膝关节采用低减速比的线传动机构驱动^[21]。

英国斯特灵大学^[22-25]研制了平面半被动动态行走机器人 RunBot, 高 23cm, 每条腿有 2 个自由度, 分别位于髋关节和膝关节, 且膝关节设计有锁死机构, 使支撑腿一直处于伸直状态, 采用圆弧足, 横杆机构保证机器人的侧向平衡, 如图 1.9

所示。应用神经元仿生控制方法实现机器人在不同地面的稳定行走。



图 1.8 Ranger



图 1.9 RunBot

美国密歇根大学 J.W.Grizzle 研制的半被动动态步行机器人 Rabbit^[26], 高 1.425m, 重 36kg, 机器人的脚设计为点足结构, 如图 1.10 所示, 机器人与地点接触, 通过无驱动长杆保持侧向稳定。采用虚拟约束法, 通过时不变有限时间收敛反馈控制策略实现行走模式的切换和速度控制。Mabel 的机构设计为单腿跳跃机器人^[27], 采用柔性驱动方式, 能够提高机器人的能量效率, 实现跑步运动, 如图 1.11 所示。在 Rabbit 机器人的基础上设计的机器人 Marlo 在无脚动态行走的基础上增加了仿人的脚结构和踝关节驱动系统, 实现了独立的 3D 动态行走^[28]。2016 年 Boston Dynamics 发布了用于户外作业的最新版的机器人 Atlas, Atlas 在雪地上行走自如^[29]。

国内, 清华大学推出了 THBIP-I 型和 THBIP-II 型双足机器人样机^[30], 初步解决了双足机器人结构设计、关节伺服驱动、快速行走步态规划等理论分析与实现技术, 实现了样机的平地行走和上下楼梯等动作。THBIP-I 样机高 180cm, 总重量 130kg, 共配置 32 个自由度。踝关节侧向关节采用了“行星减速器 + 四连杆传动”的驱动结构, 实现了踝关节侧摆和前摆两关节传动轴垂直正交, 提高了传动性能。运用三维有限元模态分析理论对双足机器人系统结构的振动特性进行了研究, 分析了支撑腿切换冲击和弹性变形对步行性能的影响^[31], 成功实现了步行周期为 0.64s、步幅为腿长 0.56 倍的快速行走。THBIP-II 高 700mm, 重 18kg, 共配置 24 个自由度, 采用模块化关节和同步带加谐波减速器的传动结构实现机器人的小型化, 采用分布式控制系统实现了步长为 15cm, 步速为 0.075 m/s 的平地行走和稳定的踢球动作^[32]。清华大学研制的 2D 半被动动态行走机器人 Achilles, 重 2.7kg, 高

0.95m, 通过“四条腿”保持侧向平衡, 共有 4 个驱动关节, 由四组 MACCEPA 驱动器进行控制。清华大学赵明国等设计了小型双足机器人 Stepper 下肢采用平行四连杆结构, 采用虚拟斜坡行走控制方法, 实现了 0.5m/s 的快速行走 [33]。

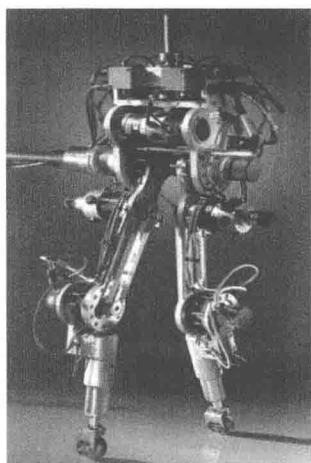


图 1.10 Rabbit



图 1.11 Mabel

北京大学工学院智能控制实验室研制了一种带有上身的半被动动态行走仿人机器人 Runbo。Runbo 的膝关节和踝关节是无驱动的被动关节, 且在每条腿上只施加一个电机驱动, 通过弹性机构完成能量的存储和释放, 实现类人的行走步态。

哈尔滨工业大学自 1985 年研制了 HIT-I—HIT-III [34,35] 系列机器人。HIT-II 具有 12 个自由度, 髋关节和腿部机构设计采用了平行四边形结构并联结构; HIT-III 具有 12 自由度, 能够实现步长 24cm, 2.3s/步的行走。2009 年哈尔滨工程大学王立权等设计的双足机器人 HEUBR-1 [36] 高 1.5 m, 质量约 30 kg, 下肢具有 14 个自由度, 采用串并混联的结构形式, 并增加了具有 1 个自由度的足趾关节, 通过拟人步态稳定行走控制实现了平稳、能耗低的行走步态。

国防科学技术大学自 1988 年开始研制了 KDW 系列机器人 KDW-I—KDW-III, 2000 年年底研制成功的双足机器人“先行者”高 1.4m, 重 20kg, 可实现前进、后退、转弯等基本行走动作 [37]。2002—2005 年, 北京理工大学先后完成了 BHR-01 和 BHR-02 仿人机器人 [38—41], 其中 BHR-02 高 1.6m, 重 63kg, 配置 32 个自由度, 可表演太极拳和刀术等复杂动作。

吉林大学设计了 PADW-JLU I 型和 PADW-JLU II 欠驱动机器人原型机。通过实验测试对系统的性能进行了验证, 实验表明欠驱动机器人原型机能够产生稳定的行走步态 [42]。