

# 动态双足机器人的 步态优化与控制

孙中波 田彦涛 张邦成 著



科学出版社

# 动态双足机器人的步态优化与控制

孙中波 田彦涛 张邦成 著



科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书系统介绍动态双足机器人步态优化与控制的主要技术,主要内容包括非线性数值优化算法及动态双足机器人发展现状与理论基础;几类非线性数值优化算法;动态双足机器人鲁棒稳定性分析;动态双足机器人步态优化控制。

本书可供从事双足机器人和下肢康复机器人研究的科研人员学习参考,也可作为相关专业的研究生或高年级本科生的教材。

### 图书在版编目(CIP)数据

动态双足机器人的步态优化与控制/孙中波,田彦涛,张邦成著. —北京:科学出版社,2018.2

ISBN 978-7-03-056532-7

I. ①动… II. ①孙… ②田… ③张… III. ①机器人-运动控制-研究  
IV. ①TP242

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 025885 号

责任编辑:魏英杰 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 伟 / 封面设计:陈 敬

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>

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2018年2月第一版 开本:720×1000 B5

2018年2月第一次印刷 印张:10 1/2

字数:200 000

定价:90.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 前 言

近年来,许多国家将机器人发展纳入国家计划,如中国制造 2025、美国先进制造业国家战略计划、欧盟 SPARC 民用机器人研发计划、日本机器人新战略、韩国机器人未来战略 2022 等。同时,世界各国纷纷将机器人纳入国家科技创新和产业发展的重点领域。因此,机器人已经成为新一轮科技与产业变革背景下世界各国产业竞争的焦点。在新科技革命和产业革命的交汇点上,以机器人科技为代表的智能产业蓬勃兴起,必将成为科技创新的一个重要标志。

动态双足机器人具有少控制自由度、低能耗的优点,可以实现拟人自然步态,通过微小的能量输入,将运动过程中的动能和势能合理转换成等效的驱动能量,实现动态双足机器人多工况、多任务的稳定周期运动。因此,动态双足机器人研究具有重要的学术意义和广阔的应用前景。虽然动态双足机器人理论与应用研究已经有三十余年的历史,但是关于动态双足机器人周期运动的相关理论研究与原型机开发相比还较为滞后。目前,国内外对动态双足机器人鲁棒稳定性与步态优化控制的研究仍存在一些亟待解决的问题。

非线性数值优化算法是解决许多实际工程问题的有利工具,但是针对动态双足机器人步态优化控制问题、最优鲁棒控制器求解问题等,现有的非线性优化理论与算法仍需深入研究。动态双足机器人的动力学模型具有非线性、强耦合、变拓扑、脉冲混杂等特性,现有的数学分析工具不能得到完整、精确的周期步态解。当动力学模型参数摄动时,设计基于参数摄动的反馈控制器以确保动态双足机器人实现变参数条件下的鲁棒稳定性是动态双足机器人研究领域极具挑战性问题。动态双足机器人的步态优化控制策略研究尚不完善。动态双足机器人的核心问题是利用低能耗的最优控制策略实现高效率动态稳定行走。对于给定的动态双足机器人结构,如何设计具有最小能耗行走步态的最优控制策略仍需深入系统研究。

本书以动态双足机器人为研究对象,主要针对具有实际工程背景下的非线性数值优化算法,以及动态双足机器人的鲁棒稳定性和步态优化控制三个关键问题进行深入的研究,完善了以动态双足机器人为代表的一类脉冲混合动力系统鲁棒稳定性分析理论,提高了双足机器人的动态稳定行走效率,实现了动态双足机器人低能耗、高效、类人的行走步态。动态行走理论在双足机器人的原型机研制过程中得到了广泛应用,然而动态双足机器人控制系统分析与综合的理论研究进程相对滞后于原型机的开发研制,有关动态双足机器人的步态优化控制与鲁棒稳定性的研究远远没有达到完善的地步。特别是,动态双足机器人周期步态的有限时间鲁

棒稳定性,以及步态优化控制理论和方法亟须深入研究。

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、教育部新世纪人才项目、吉林省人才开发资金资助项目、吉林省科技厅科技发展计划项目、吉林省教育厅科学研究规划项目研究成果的系统总结。全书框架由田彦涛制定,张邦成负责统稿,孙中波负责全书 1~5 章的写作。

限于作者水平,书中不足在所难免,恳请读者和相关专家指教。

作 者  
2017 年 10 月

# 目 录

## 前言

第 1 章 绪论	1
1.1 非线性共轭梯度算法和 SQP 算法的研究现状	1
1.1.1 非线性共轭梯度算法的研究现状	1
1.1.2 SQP 算法的研究现状	2
1.2 动态双足机器人的研究现状	3
1.2.1 动态双足机器人的研究背景	3
1.2.2 动态双足机器人稳定性分析方法的研究现状	5
1.2.3 动态双足机器人步态优化控制理论的研究现状	9
1.2.4 存在的主要问题	13
1.3 本书的主要内容与章节安排	13
1.3.1 研究目标及主要任务	13
1.3.2 章节安排	14
参考文献	15
第 2 章 动态双足机器人与优化算法的理论基础	25
2.1 引言	25
2.2 脉冲混合动力系统数学模型	25
2.3 双足机器人动力学数学模型	26
2.3.1 基本假设	26
2.3.2 Compass-Like 双足机器人动力学数学模型	26
2.3.3 带上肢的双足机器人动力学数学模型	28
2.3.4 RABBIT 双足机器人动力学数学模型	29
2.4 非线性动力系统相关理论基础	31
2.4.1 庞加莱回归映射	31
2.4.2 有限时间稳定控制 Lyapunov 函数和 Settling-time 函数	32
2.4.3 有限时间稳定性以及周期轨道稳定性	32
2.5 非线性数值优化算法相关理论基础	33
2.5.1 几类线搜索准则	33
2.5.2 非线性共轭梯度法	34
2.5.3 序列二次规划算法	35

2.6	小结	35
	参考文献	35
<b>第3章</b>	<b>非线性问题的数值优化算法</b>	<b>37</b>
3.1	引言	37
3.2	无约束优化的三项修正共轭梯度法及其全局收敛性	38
3.2.1	问题提出	38
3.2.2	三项共轭梯度法及其全局收敛性	41
3.2.3	另一类三项共轭梯度法及其全局收敛性	45
3.2.4	数值实验	47
3.3	无约束优化的二类修正谱共轭梯度法及其全局收敛性	50
3.3.1	问题提出	50
3.3.2	一类新的充分下降方向	52
3.3.3	两类修正的谱共轭梯度法	54
3.3.4	全局收敛性分析	55
3.3.5	数值实验	62
3.4	不等式约束优化超线性收敛的信赖域-SQP算法	64
3.4.1	问题提出	64
3.4.2	信赖域-SQP算法	65
3.4.3	算法的可行性和全局收敛性分析	68
3.4.4	算法的超线性收敛速率	71
3.4.5	数值实验	76
3.5	小结	77
	参考文献	78
<b>第4章</b>	<b>动态双足机器人的鲁棒稳定性分析</b>	<b>82</b>
4.1	引言	82
4.2	带有不确定项的动态双足机器人动力学模型	83
4.3	一类有限时间稳定的最优鲁棒控制器	85
4.3.1	最优鲁棒控制器的设计	85
4.3.2	最优鲁棒控制器的在线优化算法	87
4.4	数值仿真实验	92
4.4.1	参数不扰动情况	92
4.4.2	参数扰动 1.5 倍情况	97
4.4.3	参数扰动 3 倍情况	101
4.4.4	参数扰动 2 倍情况	105
4.4.5	RABBIT 双足机器人仿真实验	109

---

4.5 小结 .....	113
参考文献 .....	113
<b>第5章 动态双足机器人的步态优化控制</b> .....	<b>116</b>
5.1 引言 .....	116
5.2 基于 DMOC 的一类光滑化罚函数算法 .....	117
5.2.1 Compass-Like 双足机器人周期步态描述 .....	117
5.2.2 动态双足机器人连续动力系统和边界条件的离散化 .....	118
5.2.3 约束优化问题转化为无约束优化问题 .....	120
5.2.4 动态双足机器人步态优化的光滑化罚函数算法 .....	122
5.2.5 Compass-Like 双足机器人仿真实验 .....	124
5.3 基于 DMOC 的可行序列二次规划算法 .....	126
5.3.1 修正的可行序列二次规划算法 .....	127
5.3.2 可行序列二次规划算法的适定性和全局收敛性 .....	130
5.3.3 Compass-Like 双足机器人仿真实验 .....	134
5.3.4 RABBIT 双足机器人仿真实验 .....	140
5.4 小结 .....	145
参考文献 .....	146
附录 .....	149



# 第 1 章 绪 论

## 1.1 非线性共轭梯度算法和 SQP 算法的研究现状

### 1.1.1 非线性共轭梯度算法的研究现状

最优化理论方法是一门应用非常广泛的新兴交叉学科,主要采用数值优化算法解决从实际问题中提炼出来的优化问题。通过设计符合实际问题的优化算法寻求解决问题的最优方案,它在工程、经济、管理、国防等重要领域中的应用研究促进了最优化方法的蓬勃发展<sup>[1]</sup>。

近年来,最优化理论与方法的研究受到政府、科研机构 and 产业等部门的重视。随着工业与科技的高速发展,最优化方法的实际应用越来越广泛。在众多非线性优化问题求解算法中,共轭梯度法(conjugate gradient method)是最常用的方法之一。在 1952 年为了求解线性方程组,计算数学家 Hestenes 和几何学家 Stiefel 提出一类优化算法,该方法又称为 Hestenes-Stiefel 共轭梯度法(简称 HS 共轭梯度法)<sup>[2]</sup>。为了将 HS 共轭梯度法的思想应用到求解无约束优化问题,Fletcher 和 Reeves 较早地提出另一类非线性共轭梯度法,即 Fletcher-Reeves 共轭梯度法(简称 FR 共轭梯度法)<sup>[3]</sup>。随后,人们相继提出 4 类经典的非线性共轭梯度法,即 Polak-Ribière-Polyak (PRP)共轭梯度法<sup>[4,5]</sup>、Conjugate Descent (CD)共轭梯度法<sup>[6]</sup>、Liu-Storey (LS)共轭梯度法<sup>[7]</sup>和 Dai-Yuan (DY)共轭梯度法<sup>[8]</sup>。在精确线搜索准则条件下,如果目标函数是二次极值问题,上述 6 类共轭梯度法是等价的。另外,如果目标函数具有凸性,那么这 6 类算法的搜索方向均为共轭方向。但是,当目标函数为一般函数时,这 6 类算法的性质可谓大相径庭。在许多实际问题求解过程中,由于逼近技术的引入,不可避免地出现了舍入误差,严重破坏了搜索方向之间的共轭性,从而无法保证算法具有二次终止性。基于前述经典共轭梯度法的理论分析与数值特性,自 20 世纪 90 年代以来,围绕经典共轭梯度法展开了异常活跃的研究工作,特别是在理论分析和数值仿真两方面的探索取得了令人瞩目的研究成果<sup>[9-13]</sup>。

众所周知,PRP 共轭梯度法和 HS 共轭梯度法是经典共轭梯度法数值表现最好的两类方法。这两类算法的搜索方向具有很好的性质,可以克服算法产生的小步长现象,避免 FR 共轭梯度法和 DY 共轭梯度法可能连续产生小步长的缺陷问

题。但是,在非精确线搜索准则条件下,如果目标函数是一类非凸函数,PRP 共轭梯度法和 HS 共轭梯度法就无法确保算法产生的搜索方向在每次迭代中满足下降性质,导致这两类算法的全局收敛性遭到破坏<sup>[14-17]</sup>。针对上述问题,Glibert 和 Nocedal 提出 PRP+共轭梯度法和 HS+共轭梯度法,对于一般的非凸函数,证明两类算法均全局收敛<sup>[18]</sup>。为了保证 PRP 公式非负,Wei 等提出一类修正的 PRP 共轭梯度法,即 Wei-Yao-Liu 共轭梯度法(简称 WYL 共轭梯度法),在强 Wolfe 非精确线搜索准则条件下,证明了该方法的全局收敛性<sup>[19]</sup>。利用同样的思想,Yao 等提出改进的 HS 共轭梯度法(简称 MHS 共轭梯度法)<sup>[20]</sup>。随后,针对 PRP 公式的非负性问题,Zhou 等提出两类修正的 PRP 共轭梯度法,分析了两类搜索方向均满足充分下降性,在非精确线搜索准则条件下,分别证明这两类算法均具有全局收敛性<sup>[21]</sup>。针对文献<sup>[19]</sup>,<sup>[20]</sup>,Jiang 和 Jian 提出改进的 WYL 和 MHS 方法,在非精确线搜索准则条件下,证明了算法的全局收敛性<sup>[22,23]</sup>。实际上,上述改进方法无需在搜索方向计算公式中引进参数,也不需要改变搜索方向的计算结构,只是对 PRP 共轭梯度法和 HS 共轭梯度法作简单变形,从而得到了很好的收敛效果。但是,人们为了得到良好的收敛结果,增加了许多限制条件,这些条件有些过于苛刻,大大降低了算法的计算效率。例如,PRP+共轭梯度法的鲁棒性能没有经典 PRP 共轭梯度法好<sup>[18]</sup>。因此,既可以保证良好的收敛特性,又具有高效的计算效率已成为非线性共轭梯度法未来研究的一个重要方向。

由于经典共轭梯度法具有各自的优缺点,人们将收敛速度快、鲁棒性能好,以及计算效率高的方法进行杂交,构造了一系列杂交共轭梯度法<sup>[24-27]</sup>。由于 DY 共轭梯度法具有较强的收敛特性,而且 HS 共轭梯度法具有高效的计算效率,Dai 和 Yuan 提出一类 DY-HS 混合杂交共轭梯度法,在非精确 Wolfe 线搜索准则条件下,证明该方法具有全局收敛性,数值结果表明该方法比 PRP 共轭梯度法的数值效果好。随后,人们提出一系列混合杂交共轭梯度法<sup>[28-30]</sup>。在上述杂交共轭梯度法中,可能会出现连续调用某一类数值效果并不理想的共轭梯度法,降低了算法的计算效率,还可能会出现杂交参数选取问题,因此 Andrei 把混合参数选取作为共轭梯度法的 14 个公开问题之一<sup>[31]</sup>,从而如何设计高效的杂交算法也是共轭梯度法研究领域的难点之一。此外,在搜索方向设计过程中,如何尽可能多地吸纳目标函数的有效信息也是设计高效非线性共轭梯度法的重要研究方向。

### 1.1.2 SQP 算法的研究现状

20 世纪 70 年代以来,序列二次规划(sequential quadratic programming, SQP)算法一直是非线性约束优化领域的研究热点与难点。由于它具有超线性收敛与二次收敛等良好特性,因此从其诞生之日便吸引了许多学者的广泛关注。在这期间,不仅序列二次规划算法自身的理论和方法日趋完善,而且诸多学者将该算

法应用到其他工程与经济等各种实际优化模型上,取得了非常显著的效果。

Wilson 研究了序列二次规划求解问题的求解方法,并且证明该方法具有二阶收敛速度<sup>[32]</sup>。由于需要计算拉格朗日函数二阶梯度,并且求解这个二阶梯度的计算量又大,因此算法提出的初期,并没有引起足够的重视。直到 1976 年, Han 提出类似于求解无约束优化问题的 (Davidon-Fletcher-Powell) 修正公式,并证明算法的局部超线性收敛性<sup>[33]</sup>。之后, Powell 对 Han 的方法进行了修正,具体地给出了精确罚函数中参数的选取及矩阵修正的方法,建立了一个快速高效的方法,通常称这种方法为 Wilson-Han-Powell (WHP) 方法<sup>[34]</sup>。对于约束优化领域中的两类重要算法:信赖域方法与内点法, SQP 算法与它们有着非常密切的联系。实际上,从理论角度出发,传统的 SQP 算法存在如下两个重要缺陷。

### (1) 二次规划子问题的相容性

对于实际工程问题,利用适当的逼近技术,把实际问题转化成非线性规划问题时,二次规划子问题一般是不相容的,即二次规划子问题对应的系数矩阵可能会出现奇异的现象。即使二次规划子问题满足相容性,也可能由于初始迭代点选取不当,导致二次规划子问题无解,因此算法失效。

### (2) 存在 Maratos 效应<sup>[35]</sup>

当迭代次数充分大时,即使迭代点充分接近于最优点,算法也不能保证搜索步长恒为 1,因此影响算法的超线性收敛特性。

由于可行方向法不要求初始点和迭代点的可行性,为了克服缺陷一,学者结合可行方向法和 SQP 算法提出一系列可行序列二次规划算法 (feasible sequential quadratic programming, FSQP)<sup>[36-40]</sup>,使二次规划子问题的相容性恒成立,克服了二次规划子问题不相容的缺陷。针对缺陷二,学者提出两类比较成熟的克服方法,即高阶校正方法和 Watch Dog 技术(非单调线搜索技术)<sup>[36-38]</sup>。

针对上述问题,人们还提出诸如信赖域-SQP 方法<sup>[41-44]</sup>、内点-SQP 算法<sup>[45-47]</sup>等各类非常有效的优化算法,为约束优化的研究开辟了许多新的领域。Jian 和 Zhu 等对 SQP 方法进行了更加详细的研究,得到许多改进的结果<sup>[48-52]</sup>。随着优化理论不断发展, SQP 方法又可以应用到工程和经济等各种实际优化模型的求解中去,如均衡问题<sup>[53,54]</sup>、极大极小问题<sup>[55,56]</sup>、双足机器人步态优化问题<sup>[57,58]</sup>等。因此,针对 SQP 方法的研究仍然具有重要的理论意义与广阔的应用前景。

## 1.2 动态双足机器人的研究现状

### 1.2.1 动态双足机器人的研究背景

由于动态双足机器人具有能耗低和类人行走的特性,自 20 世纪 90 年代以来,

国内外研究机构与学者都投入了持续的研究。1997年,美国本田研究院首席科学家 Goswami 教授首创性地对动态双足被动行走机器人的理论进行了比较系统的研究,提出 Compass-Like 双足机器人模型,并进行了数值仿真与动态分析<sup>[59]</sup>。研究表明,动态双足机器人具有少控制自由度、低能耗的优点,可以实现拟人的自然步态,通过微小的能量输入,将运动过程中的动能和势能合理转换成等效的驱动能量,实现动态双足机器人多工况、多任务的稳定周期运动。其中,周期步态解的稳定性与鲁棒性是动态双足机器人能否有效地保持稳定运动首先要考虑的性能指标,是其完成动态行走任务的关键环节。实际上,人们更希望动态双足机器人在行走过程中可以根据实际工况,通过调整控制输入实现动态稳定的周期运动,即实现周期运动步态。2005年,世界著名学术期刊 *Science* 连续刊登了3篇关于动态双足机器人的研究论文,进一步推进了动态双足机器人的研究进程<sup>[60-62]</sup>。

近年来,动态行走理论在双足机器人的原型机研制过程中得到广泛应用。荷兰代尔夫特大学的 Wisse 等基于半被动动态行走理论,通过在髋关节和踝关节引入驱动,在设计 MIKE 和 Densie<sup>[63]</sup>之后,研制了三维自主行走机器人 Flame 和跑步机器人 Phides<sup>[64,65]</sup>。康奈尔大学的 Bhounsule 等研制的步行机器人 Ranger 则主要通过在髋关节添加驱动,可不停地实现 65.2km 的高效动态稳定行走<sup>[66]</sup>。美国密歇根大学 Grizzle 团队在实现机器人 RABBIT 的动态步行后相继研制了跑步机器人 MABEL 和三维双足机器人 MARLO<sup>[67,68]</sup>。MABEL 特有的柔性腿结构和驱动系统可使其对不平整路面有一定的抗扰行走能力, 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,实现了独立的三维双足动态行走。2016年 Boston Dynamics 发布了用于户外作业的最新版 Atlas 机器人, Atlas 在雪地当中行走自如,在遇到打滑和快摔倒的情形时也能即刻恢复平衡。Atlas 采用与 ZMP 理论完全不同的 Capturability 步态控制理论,证明了自己的平衡能力<sup>[69]</sup>。然而,动态双足机器人控制系统分析与综合的理论研究进程相对滞后于原型机的开发研制,有关动态双足机器人的步态优化控制与鲁棒稳定性的研究远远没有达到完善的地步,特别是动态双足机器人周期运动步态的有限时间鲁棒稳定性,以及步态优化控制理论和方法亟须深入研究。

动态运动是双足机器人研究领域的一个难点。它不仅具有重要的学术意义,而且还有现实的应用价值。动态双足步行运动优于其他运动方式(轮式移动、履带式移动等)的一个重要方面是它具有灵活性,如上楼梯、下楼梯、跨越障碍、奔跑运动等。目前,很多机器人已经成功实现了动态上楼梯、下楼梯运动。在行走过程中,由于动态双足机器人容易摔倒,摆动脚与地面撞击导致机器人更加不稳定,所以在步态规划时,需要确保机器人的姿态不能发生突变,脚落地时的速度为零,尽量减少撞击给机器人稳定性带来的影响,并且还要确保摆动脚不与台阶边缘发生碰撞。根据动态双足机器人的行走模式,下台阶与前进行走或者上台阶运动都有

各自的约束条件。前进运动将摆动脚抬起之后再向前落下脚即可,脚的抬起高度受到机器人机械结构限制。但是,上台阶时因为有台阶高度的限制,所以摆动脚抬起的高度一定要大于台阶的高度,不能提前与台阶碰撞。下台阶时不能让机器人的脚后跟碰到台阶,如果碰到台阶,那么机器人将会变得不稳定,甚至摔倒<sup>[70,71]</sup>。由于外部环境的不确定性和时变性,将导致跨越障碍成为双足机器人动态步行运动的主要任务。在跨越障碍步态规划时,需要保证摆动脚的高度高于障碍物的边缘,不能提前与障碍物发生碰撞,摆动脚落地时,需要控制好机器人的运动速度,如果过快或者过慢将导致机器人提前或者延后碰撞障碍物,进而使机器人摔倒,不能完成跨越任务。

### 1.2.2 动态双足机器人稳定性分析方法的研究现状

动态双足机器人运动稳定性问题的重要性是众所周知的。任何一个双足机器人系统总是在各种偶然的或者持续的干扰下运动。在多种任务和多工况条件下,动态双足机器人能否有效地保持运动稳定是首先要考虑的性能指标。由于动态双足机器人的变拓扑、混杂等固有本质特性,使得直接应用经典的 Lyapunov 方法分析和控制双足步行运动变得非常困难。为此,各国学者针对动态双足步行运动提出各种稳定性判据,包括庞加莱回归映射稳定性判据<sup>[72]</sup>、截面映射稳定性判据<sup>[73,74]</sup>、控制 Lyapunov 函数稳定性判据<sup>[75]</sup>、有限时间稳定性判据<sup>[76]</sup>、Zeno 稳定性判据<sup>[77]</sup>等。

庞加莱回归映射是分析周期轨道稳定性的有力工具,它的基本思想是将周期轨道的稳定性转化为平衡点的稳定性。由于庞加莱回归映射方法只能分析平衡点处的局部稳定性,因此只有对系统进行小扰动时,庞加莱回归映射才可以发挥作用。首次应用庞加莱回归映射稳定性判据分析双足步行机器人稳定性的是 Hürmüzli 等<sup>[78]</sup>。随后 Goswami 等又应用该方法分析双足完全被动行走机器人的稳定性问题。Grizzle 将该方法推广到一类带有脉冲效应的混合动力系统,分析了系统的稳定性。在应用庞加莱回归映射方法分析步行系统的稳定性时,理论上的难点与挑战来自庞加莱截面映射的计算。由于双足机器人系统是一个多变量、强耦合、非线性系统,解析计算庞加莱回归映射需要闭环系统流的表达式,因此解析的形式基本上行不通,一般采用数值方法来计算庞加莱回归映射,从而确定双足机器人系统的运动稳定性<sup>[72]</sup>。针对庞加莱截面映射计算难实现的问题,Grizzle 教授提出“降维”思想,引入虚拟完整约束概念,通过适当的坐标变换,可使受约束系统降维,并在法国研制的 RABBIT 机器人上实现了动态稳定行走<sup>[79]</sup>。田彦涛教授团队针对多自由度带膝关节的双足被动行走机器人模型,提出计算被动行走周期步态 Floquet 乘子的半解析法,利用所提方法对多自由度带膝关节的双足被动行走机器人进行局部稳定性分析,得到地面坡度,以及大小腿质量比与行走步态局部

稳定性的关系<sup>[80]</sup>。同时,将庞加莱回归映射法和胞映射法相结合,采用“变”的思想提出被动行走步态极限环吸引域的估计方法-变胞胞映射-点映射法,利用该方法对带膝关节的双足被动行走机器人进行全局稳定性分析,得到大小腿质量比与行走步态全局稳定性的关系。实际上,在复杂工况条件下,直接利用庞加莱回归映射方法分析动态双足机器人运动稳定性是比较困难的。

付成龙等针对双足机器人的任务空间模型,在切换截面处将混杂状态轨线离散成截面序列,在一定条件下,他们指出混杂状态轨线的稳定性等价于截面序列的稳定性,得到的理论结果在 THBIP- II 仿人机器人上实现了动态稳定行走。采用截面映射判断动态双足机器人周期运动稳定性时,需要计算双足机器人行走过程中所有截面序列对应的截面映射因子,并且截面映射因子的计算与系统的惯性矩阵、切换映射、切换前状态变量,以及虚拟约束有关,所以计算截面映射因子的时间复杂度很高,给稳定性判据时效性带来了巨大的挑战<sup>[73,74]</sup>。

Ames 等结合控制 Lyapunov 函数法和混合零动态思想,通过设计一类指数稳定控制器,证明动态双足机器人运动过程中的周期轨道以指数型的速度收敛到零动态曲面,并在 MABEL 双足机器人上实现了动态稳定行走<sup>[75]</sup>。基于能量和角度不变控制,田彦涛通过构造合适的 Lyapunov 函数求取能量控制分量,由于能量控制分量中包含标量增益,数值结果表明标量增益的数值并不是越大越好,其变化对于系统的影响较大<sup>[81]</sup>。标量增益中蕴含着具有一个大误差小增益性质的非线性函数,该函数不但具有较好的平滑性,而且便于调整函数值与偏差的曲线关系,从而可在线自动调整标量增益值。仿真实验表明,采用在线自动调整标量增益值的极限环收敛速度较快。另外,由极限环的收敛过程可见,当地面倾斜角度由小变大时,极限环从内向外过渡到稳定极限环。当地面倾斜角度由大变小时,极限环是从外向内过渡到稳定极限环,这和双腿的脚位移变化过程是相对应的。针对非线性不确定欠驱动脉冲混合动力系统,Nguyen 等提出  $L_1$  自适应控制方法实现了 RABBIT 双足机器人的动态稳定行走,基于控制 Lyapunov 函数和二次规划为控制器构造了一个参考模型。在模型不确定的情况下,利用自适应控制器实现了动态双足机器人的指数稳定性<sup>[82]</sup>。由于以动态双足机器人为代表的一类脉冲混合动力系统的数学模型十分复杂,如何构造简便易行的控制 Lyapunov 函数是未来研究中亟待解决的关键问题,如何设计使脉冲混杂动力系统实现动态稳定的显示反馈控制器是未来研究工作的核心问题。

Orlov 针对不确定切换系统,提出一类有限时间稳定和鲁棒控制综合的方法,实现了不确定切换系统的有限时间稳定<sup>[83]</sup>。随后,利用连续二阶滑模输出反馈综合技术,实现了带扰动的双积分系统的有限时间稳定。虽然有限时间稳定性在许多非线性系统中得到广泛的研究,但是,在动态双足机器人研究领域,有限时间稳定性还是很难解决一个公开问题。Aoustin 等首次把 Orlov 的二阶滑模输出反馈

综合技术应用到欠驱动五连杆双足机器人,通过设计依赖状态的期望轨迹、有限时间双积分器和有限时间速度观测器,实现了双足机器人的有限时间稳定周期运动<sup>[84]</sup>。随后,Oza 等结合连续二阶滑模技术和边界层方法,以及跟踪技术实现了全驱动双足机器人有限时间稳定<sup>[85,86]</sup>。但是,现有处理有限时间稳定的方法主要是集中在水平地面上的一种特殊工况条件的动态行走。对于更加复杂的路况,如不平坦路面、上楼梯、下楼梯路况等,目前还没有更好的解决办法。而且,当双足机器人的实际运动轨迹未达到参考轨迹时,即控制器没有完全控制好双足机器人的运动轨迹误差,如果此时双足机器人系统受到扰动,上述这些方法都不能保证双足机器人还能够实现稳定行走。

在机械学领域中,Zeno 行为普遍发生在系统碰撞过程之中。以动态双足机器人为代表的一类脉冲混合动力系统的一个解与系统离散部分的曲面序列的某个曲面在有限时间内接触了无限次,此时脉冲混合动力系统就会出现 Zeno 行为。这种 Zeno 行为将影响机器人动态行走的稳定性,甚至破坏机器人的周期运动使其摔倒。对于简单脉冲混合动力系统,Or 等对这种 Zeno 行为进行了一系列深入研究<sup>[87,88]</sup>。Goebel 和 Teel 探讨了 Zeno 行为与 Lyapunov 定理之间的关系,但是所得到的结果对于非平凡系统不再适用<sup>[89]</sup>。Zeno 行为理论研究的目的在于更好地揭示或指导工程实践,针对双足机器人动态行走过程中是否需要“锁死”问题,Ames 对机器人膝关节碰撞会产生 Zeno 行为进行了深入研究,给出了严格的理论分析<sup>[90]</sup>。理论分析表明,在行走过程中,如果机器人经过膝关节的“锁死”能够形成稳定的周期步态,当膝关节弹力充分小时,机器人仍然可以实现稳定行走的结论。机器人在行走过程中的膝关节弹力可以看作为脉冲混合动力系统中的 Zeno 行为。随后,Lamperski 和 Ames 利用 Lyapunov-like 充分条件提出 Zeno 稳定的 Lyapunov 定理,巧妙的解释了膝关节碰撞的 Zeno 现象<sup>[90]</sup>,Lyapunov 的 Zeno 稳定性定理很好地解释了双足机器人在膝关节处发生反弹力的 Zeno 行为,最终能够达到稳定行走,机器人膝关节“锁死”,即当摆动腿的关节角运动到极限值时,膝关节立刻“锁死”,不发生 Zeno 现象。另外,如果膝关节没有“锁死”,机器人的摆动腿反复摆动,没有能够一次达到关节角的极限值,从而发生 Zeno 现象。利用 Lyapunov 稳定性定理,结合拉格朗日系统的 Zeno 稳定条件,双足机器人的膝关节最后一定达到“锁死”状态,实现稳定周期运动。

实际工程中的双足机器人控制系统存在不确定性,因此通常难以用精确的数学模型来描述实际工程中的双足机器人系统。动态双足机器人稳定行走的初始状态对于系统的结构参数取值、行走环境都非常敏感。当系统参数或者路面坡度发生变化时,机器人容易出现不稳定的行走步态,甚至跌倒。为此,Liu 等提出变胞映射-点映射法,利用“变”的思想,获得稳定行走的初始步态,在有限时间内控制机器人达到稳定的初始状态使机器人实现稳定行走,提高了系统抗干扰能

力<sup>[80]</sup>。基于 Compass-Like 双足机器人的动力学数学模型,胡峻峰等分析了外界环境和力学参数对机器人被动步行全局稳定性影响<sup>[91]</sup>。通过计算不同模型参数下被动步行的稳定不动点,采用胞映射的方法计算不同参数下 Compass-Like 双足机器人稳定周期步态的吸引域。研究表明,Compass-Like 双足机器人被动步行的鲁棒性与外界环境、力学参数具有密切关系,提出估计不动点吸引域形状的最小半径与最大半径度量方法,给出了被动步行稳定域与动态行走斜坡倾角和质量比值的关系,通过分析某些偏离不动点较大的稳定吸引胞,以及吸引域的最小半径和最大半径的变化趋势,反映了 Compass-Like 双足机器人被动行走步态的鲁棒性。Montano 等通过分析具有单侧约束条件的混合机械系统和非线性状态反馈控制器,设计了一个非线性跟踪控制器并把这个跟踪控制器成功地应用到七连杆的双足机器人上,实现了动态稳定行走<sup>[92]</sup>。麻省理工学院 Dai 等对 Compass-Like 双足动态行走机器人在不平坦路面上实现稳定行走进行了深入的研究<sup>[93]</sup>。在不平坦的路面工况环境下,Manchester 等利用改进的滚动时域控制器,使双足机器人实现了非周期性的稳定行走<sup>[94]</sup>。Dai 等把双足机器人行走的地面扰动和运动轨迹偏移量定义为增益,利用耗散不等式和半定规划技术设计了线性反馈控制器,实现了 Compass-Like 双足机器人在不平坦路面的动态稳定行走<sup>[95]</sup>。在考虑地面随机扰动情况下,结合地面扰动给双足机器人动态行走带来的影响,Dai 等提出一步周期内达到期望运动轨迹的方法,利用非线性规划算法实现了 Compass-Like 双足机器人动态稳定行走<sup>[93]</sup>。在双足机器人动态行走过程中,外部工况环境的变化可能是随机的,根据这些随机扰动信号,Gan 等利用神经网络模型建立反馈控制器,实现了五连杆双足机器人的动态行走<sup>[96]</sup>。然而,Dai 等主要集中在对简单的 Compass-Like 双足机器人进行分析,对于多自由度双足机器人这些反馈控制方法是否能够有效地实现机器人的动态行走,还没有得到更加深入的研究。Tedrake 教授采用非线性优化算法设计反馈控制器分析 Compass-Like 双足机器人的鲁棒性,对于多自由度双足机器人,能否保证双足机器人实现动态稳定行走还是一个未知数。针对多自由度的双足机器人,如何设计快速收敛的非线性优化算法也是亟待解决的问题。针对混合机械系统鲁棒控制问题,Montano 等基于欠驱动单侧约束条件,提出非线性  $H_\infty$  输出反馈综合方法。当动态双足机器人受到外部扰动或者模型不确定时,提出确保机器人系统渐近稳定性的充分条件,得到闭环系统的良好性质<sup>[97]</sup>。针对以动态双足机器人为代表的一类脉冲混合动力系统的鲁棒稳定性问题,Hamed 等设计了连续时间控制器,提出一类系统化的分析方法。实际上,连续时间控制器是一族参数控制器。当选择不同控制器参数时,周期轨道具有不变性,利用庞加莱映射的性质和它的一阶、二阶导数把求解指数稳定周期轨道问题转化为求解一族双线性矩阵不等式问题,同时利用双线性矩阵不等式优化算法调整连续时间控制器的参数使得庞加莱回归映射的雅可比矩阵的所有特征值均匀分布在



单位圆中,从而克服切换条件导致混合系统不确定性问题,实现动态双足机器人强鲁棒的、高效稳定行走<sup>[98]</sup>。

针对动态双足机器人动力学模型的不确定性与环境约束条件的时变性,设计具有环境适应能力的反馈控制器,进而确保动态双足机器人实现变工况与未知环境条件下的鲁棒稳定性是动态双足机器人研究领域极具挑战性的问题。

### 1.2.3 动态双足机器人步态优化控制理论的研究现状

在分析和借鉴人类行走特性的基础上,研究人员已经研制开发出多款更趋合理的动态双足机器人原型机。原型机结构与运行环境工况的复杂性不断提高,对系统控制结构与算法综合提出了更高的要求,特别是有关步态优化控制问题给研究者带来新的挑战。

混合零动态方法是解决部分驱动双足机器人周期运动的有效方法之一。Westervelt 等利用混合零动态思想分别给出了带有一个部分驱动自由度的平面三连杆和五连杆双足机器人的控制方法<sup>[99,100]</sup>。近年来,Chevallereau 等把这种方法推广到三维部分驱动双足机器人,通过最小力矩损耗设计最优步态<sup>[100,101]</sup>。Sreenath 等结合虚拟约束和混合零动态设计时不变反馈控制器,通过控制器施加积极控制力矩实现 MABEL 机器人的稳定跑步运动<sup>[102]</sup>。另外,混合零动态方法已经广泛应用于双足机器人动态稳定控制问题,针对混合零动态方法出现的步态虚拟约束优化过程不可靠的缺陷,Hereid 等利用轨迹优化和线性优化算法克服了混合零动态存在的问题。结合混合零动态的稳定性和优化公式,提出多点打靶法优化虚拟约束条件,实现了 DURUS 的动态稳定行走<sup>[103]</sup>。但是,当采用零动态方法设计控制器时,理想的虚拟完整性约束不能用简单的方法得到,必须用到机器人准确的动力学模型,而且对于不同斜坡角度的行走,这种方法没有一个统一的准则来解决。如果机器人受外界高强度干扰或者工况信息变化时,这种控制算法会直接影响机器人动态步行的鲁棒稳定性。

近年来,人们将仿生学原理用于双足机器人稳定行走控制器的设计。Geng 等提出类似神经-肌肉系统的控制器,生成可在线调节速度的运动步态,通过数值模拟实现了机器人的动态稳定行走<sup>[104]</sup>。2014年,Geng 利用基于神经网络的模型预测控制方法实现了在线速度校正,可望实现机器人的变速行走,并在 Aber Walker 双足步行机器人上实现了动态稳定行走<sup>[105]</sup>。Geng 通过双层控制器控制机器人的行走速度,通过神经网络模型离线训练和在线校正的方式,调整机器人的行走速度,最终实现可调整步速的优化控制策略。中枢模式发生器(central pattern generator,CPG)控制是一种模拟生物低级神经中枢节律运动控制的方法。Endo 等利用策略梯度增强学习控制方法调节中枢模式发生器控制器的参数,实现了双足机器人在三维空间中稳定行走,提高了行走步态对环境变化的适应性<sup>[106]</sup>。Fu 等