

挖掘机器人 系统建模、 辨识与运动控制



严骏 黎波 陈海松 苏正炼 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

挖掘机器人系统建模、 辨识与运动控制

严 骏 黎 波 陈海松 苏正炼 著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书系统地介绍了挖掘机器人系统建模、辨识与运动控制的理论、方法和技术。内容既包括理论分析和详细推导,还给出了大量的试验与仿真数据,新颖丰富、系统性强。

本书从挖掘机器人系统建模与动态特性分析入手,揭示了挖掘机器人电液伺服系统的复杂非线性对控制性能的影响,通过辨识获得系统精确数学模型,然后将辨识的离散非线性模型融入到预测控制算法中,提出挖掘机器人作业的非线性预测控制,达到提高系统控制精度的目的,为挖掘机器人的智能化作业创造条件。书中所提出的方法对同类问题具有重要参考价值。

本书可供机械工程、自动控制及机器人学等相关专业的高年级本科生与研究生学习参考,也可供有关特种机器人与工程机械技术研究人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

挖掘机器人系统建模、辨识与运动控制/严骏等著.

—北京:国防工业出版社,2016.5

ISBN 978-7-118-10839-2

I. ①挖… II. ①严… III. ①挖掘机—专用机器人—研究 IV. ①TU621②TP242.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第082656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 9 1/4 字数 179 千字

2016年5月第1版第1次印刷 印数 1—1500 册 定价 80.00 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

前 言

随着机器人技术的快速发展,越来越多的机器人被应用到工程作业任务中。将机器人技术引入到工程机械中,可以实现工程机械的智能化无人作业,减轻工作人员的劳动强度,提升工程机械的作业能力。本书以作者多年来对挖掘机器人技术的研究为基础,以实验室挖掘机器人为研究对象,分析挖掘机器人运动控制系统动态特性,探讨其非线性动态模型的建立方法,并采用多种方法策略对系统模型进行辨识,在此基础上探索精确的运动控制方法。

全书共7章。第1章为绪论,阐述本书的研究背景、目的和意义,总结挖掘机器人及其相关技术研究现状、存在问题以及发展方向,介绍了书中主要研究问题、思路及内容安排。第2章和第4章为系统建模,从分析挖掘机器人试验样机电液伺服系统的动态特性入手,建立系统的机理模型。此外,基于机器人学理论,建立挖掘机械臂运动学与动力学模型,并进行运动轨迹规划。第3章和第5章为系统辨识,主要针对电液伺服系统机理建模的不足,采用新的灰箱辨识方法来获取系统的非线性模型。同时,对挖掘机械臂的动力学参数及液压缸摩擦模型参数进行辨识。第6章和第7章为运动控制,针对挖掘机器人运动控制系统特征,探讨了两种改进的PID控制算法,基于提出的参数辨识方法,结合预测控制理论,设计了能满足挖掘机器人运动控制要求的非线性预测控制算法。

本书以挖掘机器人试验样机为研究对象,从分析运动控制系统的动态特性入手,进行系统建模、辨识及运动控制方法的研究与探索。全书以挖掘机器人作业的高精度运动控制为目的,深入分析挖掘机器人电液伺服系统的非线性特性,在建立系统机理模型的基础上,进行系统辨识研究,提出了基于BLON模型的电液伺服系统非线性辨识方法;在作业系统建模与辨识的基础上,探索挖掘机器人作业的运动控制方法,分别设计了基于死区补偿的分段PID控制和基于Hammerstein模型的非线性预测控制算法,并通过试验验证算法的有效性。全书主要研究工作归结如下。

(1) 构建挖掘机器人试验样机,分别建立电液伺服系统的分段线性模型及非线性状态空间模型,通过仿真与试验详细分析系统的复杂非线性特性。

书中首先给出改造后的挖掘机器人电液控制系统,该系统采用比例减压阀代替原型挖掘机上的手动先导控制,实现了挖掘机器人的计算机编程控制。介

绍了挖掘机器人的网络监控系统,系统将基于 CAN 总线的分布式测控网与基于 IEEE802.11b 标准的移动自组网进行融合,可实现挖掘机器人的远程实时监控,能在上位机上编程实现轨迹规划和复杂的运动控制。

针对挖掘机器人电液伺服系统的主要非线性特性,首先建立了其分段线性模型,然后又建立了其非线性状态空间模型,并通过仿真与试验分析了系统存在的死区、动态特性不对称、摩擦及压力-流量增益非线性等对系统响应的不利影响,为后续进行系统辨识与运动控制策略研究指明了方向。

(2) 进行挖掘机器人电液伺服系统的辨识研究。采用基于 DRNN 神经网络的辨识方法对挖掘机器人电液伺服系统的状态空间模型进行参数辨识,获得了有效的辨识结果,为系统地控制仿真提供了参考模型,但该方法也存在未建模动态和测量噪声多的问题。

针对状态空间模型辨识的缺点,提出基于 BLON 模型的挖掘机器人电液伺服系统非线性辨识策略,并采用关键变量分离原理对 Wiener 模型、Hammerstein 模型及 H-W 模型进行化简,在仅需系统输入与输出信号的条件下,利用改进的递推最小二乘法分别对三种模型的参数进行辨识。结果表明,在输入端静态非线性模块采用了分段多项式函数的 Hammerstein 模型与 H-W 模型能有效地描述系统非线性特性。其中,Hammerstein 模型结构简单、辨识容易、逼近精度高,为设计非线性预测控制算法提供了可靠的预测模型。

针对上述三类 BLON 模型仅能描述系统静态非线性的缺点,将 H-W 模型的静态输出模块改进为动态的间隙非线性模块,获得了一个新的 P-H-W 模型,该模型能有效描述系统中的动、静态非线性。试验表明,P-H-W 模型的预测精度比 H-W 模型及 Hammerstein 模型精度高,为进行运动控制仿真提供了精确的数学模型。

(3) 建立挖掘机械臂的运动学与动力学模型,并进行轨迹规划。将挖掘机器人工作装置按选取变量的不同,划分为驱动空间、关节空间、位姿空间和检测空间四种工作空间。从挖掘机器人工作装置的几何结构特点出发,通过其几何关系求解挖掘机械臂的正与逆运动学问题、位姿空间与驱动空间的映射关系以及各运动空间的速度关系,为进行轨迹规划和运动仿真奠定理论基础。

基于机器人学理论,采用拉格朗日法建立了挖掘机械臂的二自由度动力学模型,采用牛顿-欧拉法建立了挖掘机械臂的三自由度动力学模型。

针对挖掘机器人工作装置的结构特点及其作业特征,采用混合空间轨迹规划策略,在笛卡儿空间规划动臂与斗杆两关节的轨迹,而单独在关节空间对回转关节和铲斗关节按作业要求进行轨迹规划。利用该方法规划的地面平整作业轨迹为进行挖掘机器人作业的控制试验创造了条件。另外,书中还基于挖掘机器人的三维实体模型,进行了直观的离线轨迹规划。

(4) 进行挖掘机械臂动力学模型参数辨识,分析液压缸摩擦模型的影响。分别对挖掘机器人斗杆关节及铲斗关节进行独立关节的动力学参数辨识,并对铲斗液压缸摩擦模型的选择进行对比分析,结果表明采用 Stribeck 摩擦模型时动力学模型的预测精度最高。基于建立的动力学模型,对挖掘机器人的斗杆与铲斗关节进行二自由度动力学模型参数辨识,获得了模型的组合参数值,为系统仿真与控制提供了有效的动力学参考模型。

(5) 探索挖掘机器人作业的运动控制策略。在进行运动控制系统分析与建模的基础上,提出带死区补偿的分段 PID 控制策略,通过试验调试,取得了良好的控制效果。该方法能有效克服系统的不对称动态特性及死区非线性,但是仅适用于外界干扰相对较小的情况。针对此问题,又采用具备自适应能力的单神经元 PID 控制策略,仿真试验表明该方法比常规 PID 控制效果好,能在一定程度上克服外界干扰。单神经元 PID 的缺点是收敛性难以保证,不利于实机应用,但是它也为选择基于非线性模型的预测控制策略提供了启示。

(6) 进行挖掘机器人作业的非线性预测控制研究。基于线性预测控制理论,采用书中提出的 Hammerstein 模型作为预测模型,设计了非线性预测控制算法。该算法利用 Hammerstein 模型的中间线性模型进行多步最优预测,求得中间状态的滤波值后,采用一种新的近似法求解 Hammerstein 模型的输入量,即系统的控制输入量。仿真结果表明,基于 Hammerstein 模型的非线性预测控制比线性预测控制精度高。进行挖掘机器人的地面平整作业试验,通过实机编程将基于 Hammerstein 模型的非线性预测控制与带死区补偿的分段 PID 控制进行对比研究,试验结果表明,基于 Hammerstein 模型的非线性预测控制精度更高,能更好地克服系统非线性及负载干扰,可有效提高挖掘机器人作业精度。该方法编程容易,调试方便,具有很好的应用推广价值。

综上所述,本书以系统建模与动态特性分析为基础,深入分析挖掘机器人电液伺服系统的复杂非线性特性对控制响应的不利影响,通过系统辨识获得系统的精确数学模型,最后将辨识的离散非线性模型融入到预测控制算法中,提出挖掘机器人作业的非线性预测控制,达到了提高系统控制精度的目的,为挖掘机器人的智能化作业创造了条件。值得指出的是,书中所提出的电液伺服系统非线性辨识方法对一般机电液复杂系统的建模与辨识有重要参考价值,所采用的混合空间轨迹规划方法也可为类似的工程机器人轨迹规划提供参考,所设计的分段 PID 和非线性预测控制算法对其他相似系统的控制也具有很好的借鉴参考意义。

本书涉及机械科学、自动控制理论、现代电子技术、传感器技术、信息通信技术以及机器人学等多学科领域,是多学科知识的综合运用与创新。本书既可以作为机械工程、自动控制及机器人学等相关专业的高年级本科生与研究生的

学习参考书,也可以作为有关特种机器人与工程机械技术研究人员的参考书。

本书在撰写过程中,得到了解放军理工大学野战工程学院和解放军后勤工程学院领导与同志们的支持。同时,本书参考并引用了大量国内外相关文献。在本书出版之际,谨向支持与协助本书编写工作的同仁表示衷心感谢。感谢国家自然科学基金(51505494)、中国博士后科学基金(2015M582836)、重庆市博士后科研项目特别资助(Xm2015060)对本书内容研究的支持。

由于现代信息技术的快速发展,作者理论技术水平与所掌握资料的有限,书中缺点和错误在所难免,敬请各位专家和读者批评指正。

作者

2015年12月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 工程机械与机器人技术	1
1.2 挖掘机器人运动控制研究目的与意义	2
1.3 挖掘机器人研究综述	4
1.3.1 挖掘机器人概述	4
1.3.2 挖掘机器人智能规划控制	5
1.3.3 挖掘机器人运动控制	6
1.4 相关理论与技术研究现状	9
1.4.1 电液伺服系统建模、辨识与控制研究现状	9
1.4.2 机械臂动力学参数辨识与控制研究现状	13
1.5 本书体系结构	15
1.5.1 总体思路	15
1.5.2 体系结构	16
第 2 章 挖掘机器人电液伺服系统建模与动态特性分析	18
2.1 机器人化液压挖掘机	18
2.1.1 挖掘机器人电液控制系统	18
2.1.2 挖掘机器人网络监控系统	20
2.2 挖掘机器人电液伺服系统分段线性模型	23
2.2.1 电液比例阀简化模型	23
2.2.2 阀控非对称缸分段传递函数	23
2.2.3 挖掘机器人电液伺服系统分段传递函数仿真与试验分析	28
2.3 挖掘机器人电液伺服系统非线性建模	29
2.3.1 电液伺服系统非线性状态空间模型	30
2.3.2 系统非线性动态特性的仿真与试验分析	33
2.4 本章小结	37

第 3 章 挖掘机器人电液伺服系统辨识	38
3.1 基于神经网络的电液伺服系统状态空间模型辨识	38
3.1.1 电液伺服系统的简化状态空间模型	38
3.1.2 DRNN 神经网络辨识 Jacobian	39
3.1.3 辨识试验与验证	41
3.2 基于 BLON 模型的电液伺服系统非线性辨识	43
3.2.1 挖掘机器人电液伺服系统的 BLON 类模型表示	44
3.2.2 改进的最小二乘辨识算法	45
3.2.3 辨识试验对比分析	48
3.3 基于 P-H-W 模型的非线性辨识	51
3.3.1 系统的 P-H-W 模型表示	51
3.3.2 递推辨识算法	52
3.3.3 辨识试验结果分析	53
3.4 本章小结	55
第 4 章 挖掘机械臂运动学、动力学建模及其轨迹规划	57
4.1 运动学建模	57
4.1.1 运动学空间划分	57
4.1.2 工作装置运动学模型	58
4.2 动力学建模	63
4.2.1 基于拉格朗日法的二自由度动力学方程	64
4.2.2 基于牛顿-欧拉法的三自由度动力学方程	65
4.3 挖掘机械臂轨迹规划	69
4.3.1 机器人轨迹规划概述	69
4.3.2 混合空间轨迹规划及其盲位盲角分析	70
4.3.3 基于三维实体模型的轨迹离线规划	73
4.4 本章小结	74
第 5 章 挖掘机械臂动力学模型参数辨识	76
5.1 单关节动力学参数辨识	76
5.1.1 斗杆关节动力学模型参数辨识	76
5.1.2 铲斗关节动力学模型参数辨识与摩擦模型分析	80
5.2 挖掘机械臂的二自由度动力学参数辨识	86
5.2.1 二自由度动力学模型化简	87

5.2.2	辨识试验结果分析	89
5.3	本章小结	91
第6章	挖掘机器人工作装置运动控制策略研究	92
6.1	挖掘机器人作业轨迹跟踪的分段PID控制	92
6.1.1	分段PID控制策略	92
6.1.2	分段PID控制试验分析	93
6.2	挖掘机器人作业的单神经元自适应PID控制	96
6.2.1	单神经元PID控制算法	96
6.2.2	单神经元PID控制仿真	97
6.3	本章小结	98
第7章	挖掘机器人作业的非线性预测控制	100
7.1	线性预测控制算法	100
7.1.1	线性预测模型及其参数在线估计算法	101
7.1.2	j 步最优预测	101
7.1.3	Diophantine 方程的递推算法	103
7.1.4	多步预测自校正控制算法	105
7.2	基于 Hammerstein 模型的非线性预测控制	108
7.2.1	Hammerstein 预测模型	108
7.2.2	非线性预测控制自适应算法	110
7.2.3	挖掘机器人作业的非线性预测控制仿真	114
7.3	挖掘机器人作业的非线性预测控制试验研究	118
7.3.1	控制试验准备	118
7.3.2	试验结果分析	119
7.4	本章小结	121
附录1	最小二乘法	122
附录2	挖掘机械臂运动学参数	123
附录3	基于牛顿 - 欧拉法的挖掘机械臂动力学建模	125
参考文献	136

第 1 章 绪 论

本章从工程机械与机器人技术现状及发展趋势入手,主要论述挖掘机器人的研究背景,对挖掘机器人的研究现状进行综述,对挖掘机器人系统建模、辨识与控制研究涉及的相关技术理论进行概括分析,为后续章节指明研究方向。

1.1 工程机械与机器人技术

随着现代科学技术的发展和工业机器人的广泛应用,机器人技术对人类生活各方面的影响越来越大,也越来越多地被应用到一些特殊的作业任务^[1],如建筑采矿、月球探测、海洋开发、抗震救灾、灭火排爆以及军事工程保障等领域。

工程机械是工程建设施工机械的统称,广泛用于建筑、水利、电力、道路、矿山、港口和国防等工程领域,应用机器人技术可有效提高其作业效率,减轻劳动强度,提高工作可靠性^[2]。工程机械作为部队作战工程保障的重要装备,引入机器人技术,能有效提高装备的作业质量,辅助人工完成一些高危环境下的特殊作业,大大提高装备的自动化、信息化和智能化水平^[3],也无疑会提升部队工程保障能力。

欧美等发达国家从 20 世纪 70 年代就开始对工程机械进行机电液一体化及机器人化技术的应用研究,我国则是在 20 世纪 90 年代初才意识到机器人技术对提升工程机械工作性能和质量的重要性,并在国家 863 智能机器人主题的支持下,开始工程机械机器人化关键技术理论与应用的研究^[4]。虽然国内起步较晚,但在多个工程机械机器人研究领域取得了可喜成绩,典型的成果有^[5]:喷浆机器人、压路机器人、自动摊铺机、隧道凿岩机器人、隧道掘进机器人、装载机机器人、挖掘机器人等。从相关文献检索统计来看,将机器人技术应用得最广、最深、最好的是挖掘机、装载机和推土机,其中又以工作装置相对更为复杂的挖掘机机器人研究最多。

液压挖掘机是一种多用途的工程机械,在民用建筑施工、抗震救灾以及国防工程建设等领域发挥着重要作用^[6]。长期以来,在挖掘机的施工过程中存在着操作人员劳动强度大、工作环境恶劣、操作人员培训时间长、难以人工完成一些高质量的作业任务,如平坡、挖沟等任务。面对上述问题,人们开始了挖掘机

的自动控制研究,将机电一体化技术应用到挖掘机的液压控制系统中,以实现挖掘机的局部作业自动化^[7],这样既减轻了操作人员劳动强度又提高了系统的安全性和节能性。将机器人技术应用到挖掘机上,实现挖掘机的机器人化和无人化作业是众多科研技术人员一直以来的共同目标。机器人化的挖掘机,通称挖掘机器人,通过智能控制将人从繁重的机械操纵任务中解放出来,不仅能在民用建设施工等领域中发挥重要作用,在军事工程保障中也能发挥积极作用。在作战工程保障中,挖掘机器人可以在无人驾驶的情况下进入危险战区作业,进行战地清除、武器销毁及掩埋等危险任务,既保证了人员安全,又能提高部队机动性和作战工程保障能力。

挖掘机器人是一个综合的“机—电—液—信息”四维一体化系统,其智能作业的研究涉及到机械科学、电工电子技术、现代通信技术、计算机技术、传感器技术、信息处理技术、自动控制技术、人工智能等多学科领域。如今,相关学科的快速发展为实现挖掘机器人的智能化作业提供了技术支持。可以预见,未来的挖掘机器人将具备较强的信息处理能力、感觉认知能力、智能判断能力以及自我适应能力,它将使现在的液压挖掘机产品性能和质量产生质的飞跃,大大提升工程机械信息化水平。

挖掘机器人的研究步骤是在实现挖掘机“机—电—液”一体化和挖掘机局部操作自动化的基础上,引入最新的机器人技术和智能控制技术,以实现其作业过程的智能化和完全无人化。实现挖掘机器人的模式化编程控制和远程遥控已经不是难事,国内外多家研究机构已经研制出能在简单环境下自动作业的挖掘机器人^[8-13],但要实现挖掘机器人完全无人化智能作业还有很长的路要走。

挖掘机器人作业系统辨识与运动控制是挖掘机器人研究的热点和重点,但是,挖掘机器人工作装置动力学参数的耦合性、电液伺服系统的时变非线性^[14]以及外界负载力的不确定性^[15]等因素,使得以往单纯针对电液伺服系统或机械臂系统的控制方法不能很好地满足挖掘机器人作业系统的高性能运动控制。研究与探索简单、实用、快速、有效、先进的挖掘机器人作业系统辨识与运动控制方法,不仅是无人化挖掘机器人应用实践的迫切需要,更是工程机械向信息化、智能化、机器人化方向发展所面临的重要挑战和机遇。本书将重点研究探讨这方面的技术与理论方法。

1.2 挖掘机器人运动控制研究目的与意义

本书以挖掘机器人试验样机为研究对象,主要针对挖掘机器人作业系统建模、辨识与运动控制中存在的问题,融合电液伺服系统辨识与控制、机械臂辨识

与控制的先进理论方法,探索如何将系统辨识与运动控制理论新方法新技术结合起来,并应用于挖掘机器人作业系统的运动控制中,寻求具有良好适应性和鲁棒性的运动控制新方法和新策略。本书的研究目的是要通过新的系统辨识方法建立简单实用的挖掘机器人作业控制系统模型,并在此基础上设计快速、实用、精确的运动控制算法,以提高挖掘机器人作业系统的运动控制精度和稳定性,为挖掘机器人的完全无人化智能作业奠定基础。

本书的研究内容具有重要的理论与实践意义,主要体现在以下几方面。

1. 丰富拓展电液伺服系统的建模与辨识理论方法

挖掘机器人的电液伺服系统是一个复杂的非线性系统,系统理论模型中存在着大量的不确定性未知参数,对其进行系统辨识,找出与实际系统匹配最优的数学模型,是有效分析系统特性和设计运动控制器的关键。书中针对传统建模方法的不足,采用系统辨识理论的新方法、新技术,为复杂的电液伺服系统建模与辨识提供新途径、新思路,为完善电液伺服系统建模理论方法做出了一定贡献。同时,新的方法能有效克服传统方法的局限,在实践上更加简单易行,有利于推广应用。

2. 推动液压机械臂系统控制理论的发展与应用

挖掘机器人电液伺服系统的时变非线性、工作装置动力学耦合特性及外界负载的不确定性,使得挖掘机器人作业系统的运动控制变得异常复杂^[16],以往单纯的电液伺服控制方法和机械臂运动控制方法不能简单地借鉴应用。本研究从试验探索出发,针对系统特点,对传统控制算法进行改进,并将现有的辨识技术和控制理论进行融合,提出有效的运动控制算法,促进了液压机械臂系统控制理论的发展。同时,本书的研究思路和方法能为工程机械自动化技术的推广应用提供参考。

3. 促进系统辨识方法与控制理论的结合

系统辨识与控制往往是相互联系不可分割的,辨识是手段,精确的伺服控制则是目的。书中首先探讨了挖掘机器人电液伺服系统非线性模型辨识方法,并基于此辨识方法探索新的自适应控制策略,在这个不断尝试与实践的过程中,得到新的、高效的伺服控制方法,为非线性系统辨识与自适应控制相融合的理论与应用研究提供了借鉴参考。

4. 提高工程机械自动化和信息化水平

高度智能的无人化工程机械是大规模建设施工和现代化军事装备的发展需求,代表着未来的发展方向。我国工程装备正处于机械化向信息化过渡的关键时期,现代战场的复杂性与不确定性对工程机械保障提出了更高的要求,需要装备具有更快的反应能力、更精确的执行能力、更智能的适应能力。汶川大

地震等突发事件,就对工程机械快速精确的应急保障能力提出了新的需求,使得自动化和信息化成为必然选择。通过对挖掘机器人作业系统辨识与运动控制策略的研究,可以有效提高挖掘机器人的自主作业能力,为下一步挖掘机器人的无人化智能作业的工程应用打下良好基础。

总之,本书希望通过对挖掘机器人作业系统的建模、辨识与运动控制的研究,探索挖掘机器人工作装置在实际作业过程中的精确运动控制方法,为挖掘机器人的全面智能控制打下基础,为工程机械自动化与智能化提供新的理论方法与应用技术支撑。

1.3 挖掘机器人研究综述

1.3.1 挖掘机器人概述

人们对挖掘机器人的研究始于20世纪70年代^[17],最初是为提高挖掘机的工作效率和操作人员的安全,对普通液压挖掘机进行的微机编程控制^[18]和远程遥控研究^[19]。随着工业机器人技术的不断进步,挖掘机器人也从刚开始的示教再现^[20]及遥控操纵^[21]发展到位置伺服控制^[22]及力伺服控制^[23]。经过几十年的发展,已出现了具有视觉伺服控制^[24]和触觉感知功能的远程遥控挖掘机器人^[25, 26],并逐步向着具有感知和规划决策能力的全面智能控制方向发展。

挖掘机器人是在挖掘机原型系统上,根据功能需要,升级改造电液控制系统、计算机控制系统、智能监控系统等,系统主要由发动机、液压泵、电液控制阀(伺服阀或比例阀)、液压执行元件(液压缸或液压电机)、工作装置、关节位置传感器(倾角传感器或位移传感器)、压力传感器、视觉传感器、控制器以及通信系统等组成。目前,国内外典型的挖掘机器人系统有美国Carnegie Mellon大学研制的自主装载系统(Autonomous Loading System, ALS)^[27],英国兰卡斯特大学的智能挖掘机(Lancaster University Computerized Intelligent Excavator, LUCIE)^[28],我国浙江大学机械设计研究所^[29]、中南大学机电工程学院^[30]以及解放军理工大学机电教研中心^[31]都有比较成熟的挖掘机器人试验平台。另外,澳大利亚机器人技术中心(Australian Center for Field Robotic, ACFR)对PC05-7小松挖掘机进行了机器人化改造,采用电液伺服阀代替手动控制,利用M2000控制器和工业PC机构建了一个两级控制系统^[32]。东北大学机械电子研究所将PC02挖掘机进行了机器人化改造^[33],吉林大学机械科学与工程学院的研究者则将某小型挖掘机改造为排雷机器人^[34],并将其用于挖掘试验。上述系统大都采用先导电液阀控制主阀的形式,这也是挖掘机器人电液控制系统的主流形式。图1-1所示为几个典型的挖掘机器人样机。



(a) ACFR 挖掘机器人

(b) The ALS

(c) The LUCIE

图 1-1 典型挖掘机器人样机

挖掘机器人的理论研究主要涉及以下三个层面^[35]:高层的挖掘任务规划;环境识别与轨迹(包括路径)规划;底层的系统辨识与运动控制。任务规划、环境识别与轨迹规划涉及到人工智能领域的研究,是挖掘机器人完全无人化作业的关键技术。底层的运动控制则是挖掘机器人有效完成指定任务轨迹的基础,是实现挖掘机器人智能控制的前提条件。通常的工业机器人拥有确定的工作环境,在结构化的工作模式下,能直接对驱动电机进行力矩控制来完成规定任务。挖掘机器人则往往工作在不确定的非结构化环境中,作业对象复杂多变,而其电液伺服系统又是典型的时变非线性系统,且液压驱动装置不能直接进行力矩控制。可见,研究出灵活智能的高层决策规划方法和轨迹规划方法是挖掘机器人自主作业的基础,而拥有快速精确的伺服运动控制方法则是提高其工作效率的保障。

1.3.2 挖掘机器人智能规划控制

挖掘机器人的智能规划控制主要是指系统根据接收到的工况信息进行任务规划、路径规划和轨迹规划^[36],能够根据生产目的自动生成子任务,然后再将任务分解为不同的动作和作业轨迹。系统根据指定的任务目标进行行为规划,生成完成任务所需的路径和轨迹,并根据实时检测到的工况信息进行综合分析,对路径和轨迹序列进行自动修正,实现挖掘过程的自主避障和最优路径。根据前文所述,挖掘机器人的规划可分为最高层的任务规划和中间层的路径及轨迹规划。

在任务规划方面,Arizona 大学的 Lever 等采用模糊规则来描述挖掘阻力或力矩^[37],设计了基于模糊行为的智能控制策略^[38],并通过碎石挖掘试验证明了其有效性^[39]。Arizona 大学的 Shi 等则在模糊行为规则基础上^[40,41],采用有限状态机(Finite State Machine, FSM)^[42]将挖掘目标分解为若干任务,再将每个任务分解为若干行为,最后将行为分解为多个执行动作,试验表明这种基于模糊行为整合和有限状态机任务分解的智能控制策略比 Lever 的方法更有效^[43,44]。

Wang 设计了一个基于控制真体 (Agent) 的智能挖掘策略^[45], 通过模糊行为规则将复杂任务进行分解, 采用不同的控制真体来完成各简单动作, 利用基于 Petri 网和模糊逻辑的规则来组织协调控制真体和具体动作。试验表明, 该智能规划控制方法能在非结构化环境下有效地绕过大障碍进行挖掘作业。Carnegie Mellon 大学的 Singh 提出了基于执行空间 (action space) 的智能规划策略^[46], 采用参数变量来抽象地描述具体动作, 将任务、几何约束和力约束统一在执行空间内, 使得总体任务规划可分解为子任务的约束优化问题, Singh 通过大量的试验证明了其方法的有效性, 并指出良好的底层伺服控制方法对上层任务规划是有利的。Singh 后来又提出了多层规划策略^[47], 通过层层优化不断地改进规划动作。Rowe 在 Singh 研究的基础上, 设计了一个自适应的运动规划系统^[48], 采用参数化的脚本 (parameterized scripting) 来描述任务中的连续执行步骤, 在每一个装载循环中根据工况对参数进行调整, 试验表明该系统与熟练操作手的工作效率相当^[49]。

在路径与轨迹规划方面, Budny 等针对挖掘机的装卸过程, 设计了轨迹优化策略, 通过仿真试验获得时间上最优的作业轨迹^[50]。Carnegie Mellon 大学的 Krishna 也对挖掘机器人的作业轨迹进行了优化, 并同时获得了时间上和耗能上的轨迹优化策略^[51]。浙江大学的研究者建立了挖掘机器人的虚拟样机模型^[52,53], 并利用该模型进行节能控制和轨迹规划仿真^[54]。Makkonen 等建立了某六自由度挖掘机器人的三维 CAD 模型, 并在虚拟环境下进行路径和轨迹规划^[55]。Bodur 等基于挖掘机器人动力学模型设计了一个具有力觉感知的轨迹修正规则, 以避免过大的负载力对系统的损害^[56]。

综上所述, 现有的挖掘机器人任务规划与路径及轨迹规划方法大多还停留在试验阶段, 不能完全满足复杂的工程应用需求, 随着计算机技术和人工智能的不断发展, 实时在线的轨迹规划方法和更加智能高效的任务规划策略将有望实现突破。可见, 挖掘机器人的任务规划、路径规划及轨迹规划能力决定了其智能化程度的高低, 而智能控制策略也需要有良好的运动控制方法支撑。

1.3.3 挖掘机器人运动控制

挖掘机器人的运动控制主要指挖掘机器人根据上层规划轨迹, 进行回转、动臂、斗杆、铲斗关节的伺服控制及行走与其他辅助机构的运动控制。运动控制理论研究主要集中在工作装置的位置伺服控制和柔顺控制方法。

1. 位置伺服控制

挖掘机器人电液伺服系统是典型的非线性系统^[57], 主要表现在比例阀死区、间隙、系统延迟、流量压力非线性、阀控非对称缸动态响应不对称、液压缸非

线性摩擦、温度变化引起的系统参数变化等;当执行复合动作时,电液伺服系统还存在流量耦合现象,而其工作装置又存在动力学耦合和负载力不确定性。上述种种不利因素要求挖掘机器人工作装置的位置伺服控制方法必须具备一定的适应性和鲁棒性,能有效克服系统非线性与不确定性带来的不利影响。目前,挖掘机器人的位置伺服控制方法主要有以下几大类。

(1) PID 控制方法。PID 控制器因其设计简单,参数调整方便等优点,广泛应用于工业控制各领域。Gao 等给挖掘机器人工作装置三个关节分别设计了独立关节 PID 控制器^[58],进行空载条件下的直线挖掘试验,取得了一定的跟踪精度。Koivo 等在建立挖掘机工作装置动力学模型基础上,设计了带动力学模型补偿的 PD 控制器,并通过仿真试验验证了该算法^[59]。何清华^[60]、张大庆等^[60,61]也对某挖掘机进行了带死区补偿的 PID 控制试验。上述方法中,均假设系统无外界负载,且在工作速度不高的情况下进行试验,当加快跟踪速度或有外界负载时,PID 控制器往往达不到理想的控制精度。可见,传统的 PID 控制方法在鲁棒性和适应性方面还难以满足挖掘机器人作业系统的高精度运动控制要求。

(2) 滑模变结构控制。滑模控制能有效克服系统模型的不确定性,是一类鲁棒控制方法。张大庆等设计了带滑模观测器的变结构控制器,对某挖掘机轨迹进行跟踪试验,控制误差在 30mm 内^[62]。Ha 等设计了模糊滑模控制器,通过模糊整定降低系统抖振影响,在沙质土壤的挖掘试验中取得了较高的跟踪精度^[63]。张金萍等采用了与 Ha 相似的控制方法,并对某四自由度挖掘机进行了虚拟仿真试验^[64]。滑模控制的缺点在于采用计算机控制时存在不可避免的“抖振”现象,而当外界负载变化较大时,为有效克服系统的不确定性需要较大的控制功率,会引起系统饱和,甚至破坏系统稳定。

(3) 自适应控制与自适应鲁棒控制。鲁棒控制适合于处理小范围内的快变不确定性,而自适应控制则适合于处理大范围内的慢变不确定性^[65],将两种方法有机结合,常数或慢变参数不确定性由自适应方法来克服,而其他不确定性由鲁棒控制来处理,就构成了自适应鲁棒控制。何清华等在给出系统一阶线性模型基础上^[66],应用局部参数最优化方法设计了自适应控制器,试验表明铲斗的直线跟踪速度在 $135\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,误差可以控制在 100mm 之内。Chiang 等对某挖掘机先导控制系统进行了改造^[67],设计了模型参考自适应控制器,采用负梯度法对参数进行在线辨识,以适应载荷的变化,其直线跟踪误差在 1cm 左右。自适应控制算法的有效性依赖于参数估计的准确性,不利于在具有各种硬非线性特性的挖掘机器人系统上实现。Yao 等设计了基于积分反推技术的自适应鲁棒控制器(ARC)^[68],并将其用于控制某液压机械臂。Yao 等还将此自适应鲁棒控制应用于挖掘机器人的回转运动控制^[69],取得了较高的精度。但是,该