

混合驱动柔索并联机器人

力学分析与跟踪控制技术

Mechanics Analysis and Tracking Control Technology
of Hybrid-Driven Based Cable Parallel Robots

訾 斌 著



科学出版社

混合驱动柔索并联机器人 力学分析与跟踪控制技术

Mechanics Analysis and Tracking Control Technology
of Hybrid-Driven Based Cable Parallel Robots

訾 斌 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书在综述近年来国内外柔索并联机器人广泛工程领域应用、研究进展、密切围绕国际学术前沿的基础上,重点阐述与作者设计的混合驱动柔索并联机器人系统相关的基础理论和关键技术,是国家自然科学基金、国家博士后科学基金特别资助和江苏省高校优势学科建设工程等项目的研究成果的系统总结。主要内容包括:混合驱动平面五连杆并联机构的动力学与优化设计,柔索并联机器人伺服驱动系统动态建模与模糊滑模控制,混合驱动柔索并联机器人设计分析、误差建模与灵敏度分析、动力学分析、轨迹跟踪控制和集成优化设计问题的研究。

本书条理清晰、内容丰富、图文并茂,便于学习,注重内容的层次性、系统性及理论联系实际。

本书可供机械电子工程、机械设计及理论、控制理论与控制工程等相关专业的研究生和高年级本科生阅读,也可作为机器人研究及自动化相关方向的科研人员与工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

混合驱动柔索并联机器人力学分析与跟踪控制技术/菅斌著. —北京:科学出版社,2013

ISBN 978-7-03-038656-4

I. ①混… II. ①菅… III. ①电动机器人-柔性机器人-动力学分析②电动机器人-柔性机器人-机器人控制 IV. ①TP242

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 226012 号

责任编辑:钱 俊 鲁永芳 / 责任校对:宣 慧

责任印制:赵德静 / 封面设计:陈 静

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>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013 年 10 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2013 年 10 月第一次印刷 印张:11 1/4

字数:209 000

定价:56.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



前 言

柔索并联机器人是继串联机器人和并联机器人之后出现的一种新型并联机器人机构,在刚度和工作空间方面,柔索并联机器人介于串联机器人和并联机器人之间。由于采用柔索代替连杆作为并联机器人的牵引元件,柔索并联机器人具有结构简单、工作空间大、易拆装、可重组、模块化程度高、负载能力强、运动速度快以及价格低廉等特点。近年来,受世界经济快速增长和世界贸易不断扩大的影响,柔索并联机器人工程应用日渐增多。例如,各国研究人员纷纷开展这方面的研究工作,研制了用于起重、检测、加工、港口货物吊装、船舶建设、海底打捞、废物清理、石油油井灭火、超大口径射电望远镜跟踪射电源的运动、风洞飞机模型实验等多种用途的柔索并联机器人样机。因此,对柔索并联机器人的研究具有重要的学术研究和现实的实际工程应用需求。

近年来,随着柔索并联机器人在工程领域的应用不断扩大,这也对柔索并联机器人提出了更高的要求,不仅能够高精度、高效率、大负载地运转,而且应具有更大的柔性输出,能迅速、方便地改变输出运动规律。然而,由于受到伺服电动机功率和扭矩的限制,目前还没有直接利用伺服电动机驱动大跨度、高负载的柔索并联机器人。柔索并联机器人系统的关节驱动问题是机构学基本而重要的问题。对一个驱动机构来讲,关心的是输出功率大小和作业适应性程度。对于前者,希望机构输出功率越大越好,而对于后者,希望作业适应性的程度越高越好。通常,机器人系统中有普通常速电动机和伺服电动机两种电动机驱动。普通常速电动机功率高,但作业在线适应性差,而伺服电动机具有很好的在线适应性,但单位价格的输出功率较低。因此,可以利用“互补原理”将这两种驱动机构组合在一起,构成混合驱动机构。显然,混合驱动机构兼容了传统机构的高效率、高承载力及伺服驱动机构柔性可调的优点,从而弥补了传统机械缺乏柔性,伺服机构不能承受大载荷的缺陷。

本书阐述一种将混合驱动机构引入到柔索并联机器人,提供一种结构简单、模块化程度高、能够大负载运转、高性能运动输出,实现复杂运动规律,完成高精度作业过程的混合驱动柔索并联机器人系统及其相关基础理论和关键技术问题研究,不仅包括对混合驱动柔索并联机器人机构优化设计、工作空间与奇异位形分析、误差建模与灵敏度分析以及动力学分析等基础理论和科学问题的阐述,同时加入了混合驱动柔索并联机器人系统的技术发展前沿,如机构与控制集成设计技术,智能控制技术,机械、力学、控制、信息、计算机等多学科领域联合分析技术等的应用,力

求内容上与国内外最新研究成果同步;研究成果可为混合驱动柔索并联机器人系统的综合性能提升、设计、开发和有效工程应用奠定基础,同时也为此类多自由度并联机器人的动态特性、优化设计和控制等研究提供借鉴。

为了实现本书的目标,全书共分8章。第1章是绪论,主要论述混合驱动柔索并联机器人的工程背景及研究意义、国内外研究现状及发展动态和本书的目标等;第2章主要论述混合驱动平面五连杆并联机构的动力学与优化设计;第3章主要论述柔索并联机器人伺服驱动系统动态建模与模糊滑模控制;第4章主要论述混合驱动柔索并联机器人设计分析;第5章主要论述混合驱动柔索并联机器人误差建模与灵敏度分析;第6章主要论述混合驱动柔索并联机器人动力学分析;第7章主要论述混合驱动柔索并联机器人轨迹跟踪控制;第8章主要论述混合驱动柔索并联机器人系统集成优化设计。

本书研究工作得到了国家自然科学基金(项目编号:50905179,51275515)、国家博士后科学基金(项目编号:201003605)特别资助和江苏省高校优势学科建设工程等项目的资助,在此表示衷心感谢。同时,作者要特别感谢段宝岩院士、朱真才教授对作者工作的支持和帮助,也要感谢研究生曹建斌、吴瑕、钱森、孙辉辉等同学对本书相关研究工作所做出的贡献。

由于作者水平和经验所限,本书难免存在不妥之处,敬请读者和专家批评指正。

作 者

2013年5月

符 号 表

b	柔索塔间距
C	离心力和哥氏力矩阵
de	末端执行器空间位置误差矩阵
dq	混合驱动柔索并联机器人误差源误差矩阵
$\tilde{E}$	混合驱动柔索并联机器人系统的动能
E_g	混合驱动柔索并联机器人末端执行器的动能
E_l	混合驱动平面五连杆并联机构的总动能
E_{li}	第 i 组混合驱动平面五连杆并联机构的动能
F	广义力
$F_{\square x}$	混合驱动平面五连杆并联机构铰接点 $\square$ 处 x 方向约束反力
$F_{\square y}$	混合驱动平面五连杆并联机构铰接点 $\square$ 处 y 方向约束反力
f_m	电机及负载折算到电机轴上的等效黏性摩擦系数
G	重力向量
$\tilde{G}$	混合驱动柔索并联机器人系统的势能
g	重力加速度
h	柔索塔支架高度
J	雅可比矩阵
J_f	飞轮的转动惯量
J_k	卷筒机的转动惯量
J_m	电机转子的转动惯量
J_r	减速装置等效到轴上的转动惯量
J_{Δ}	混合驱动柔索并联机器人的误差传递矩阵

$J_{\Delta ic}$	第 i 组混合驱动平面五连杆并联机构的误差传递矩阵
$J_{\Delta 0}$	柔索并联机器人的误差传递矩阵
$J_{\Delta L}$	驱动柔索的误差传递矩阵
K_{ω}	阻尼系数
K_U	电动机转矩常数
k_p	比例增益系数
k_i	积分增益系数
k_d	微分增益系数
L	结构设计变量的下边界
L_i	柔索塔支架构成的空间范围内第 i 根柔索的长度
L_{AC}	混合驱动平面五连杆并联机构铰接点 A 至点 C 的距离
L_{CE}	混合驱动平面五连杆并联机构铰接点 C 至点 E 的距离
L_{0i}	第 i 根柔索的总长度
l_i	混合驱动平面五连杆并联机构各连杆的长度
M	正定对称惯性矩阵
M_a, M_b	动态转矩方程
M_m	电机电磁力矩
m	末端执行器的质量
m_i	混合驱动平面五连杆并联机构各连杆的质量
N	坐标转换矩阵
n	伺服驱动机构减速装置的传动比
p	柔索塔支架底部与对应混合驱动平面五连杆机构底部之间距离
P_{CVi}	常速电机功率
P_{SVi}	伺服电机功率
$\mathfrak{R}$	设计变量
r_i	连杆质心到端点的距离

s	混合驱动柔索并联机器人单根柔索的总长度
S_i	误差局部灵敏度
$\boldsymbol{T}$	柔索张力向量
T	采样周期
T_d	微分时间常数
T_i	第 i 根柔索的拉力
$T_{\max}$	柔索的最大许用拉力
t_s	调整时间
U	结构设计变量的上边界
U_C	电机控制电压
U_F	交流激磁电压
$\boldsymbol{W}$	并联机器人的广义总工作空间
$\boldsymbol{W}_R$	混合驱动柔索并联机器人的工作空间
ω	包含静摩擦力和弹性振动等未建模动态干扰
x_c	混合驱动平面五连杆并联机构铰接点 C 的横坐标
y_c	混合驱动平面五连杆并联机构铰接点 C 的纵坐标
α_1, α_2	加权系数
β	柔索张力方向与 x' 坐标方向的夹角
ω	电机转子速度
θ	广义坐标
θ_i	混合驱动平面五连杆并联机构各连杆与 x 轴的正向夹角
$\dot{\theta}_i$	混合驱动平面五连杆并联机构各连杆的角速度
$\ddot{\theta}_i$	混合驱动平面五连杆并联机构各连杆的角加速度
θ_m	电动机轴的角位移
τ	混合驱动平面五连杆并联机构原动杆件输入力矩
τ'	可重复的未知干扰

τ_1	常速电机驱动力矩
τ_4	伺服电机驱动力矩
Θ	关节位置矢量
$\dot{\Theta}$	关节速度矢量
Θ_d	期望关节位置矢量
$\dot{\Theta}_d$	期望关节速度矢量
$\ddot{\Theta}_d$	期望关节加速度矢量
ζ	稳态误差
δ	超调量

目 录

前言

符号表

第 1 章 绪论	1
1.1 工程背景及研究意义	1
1.2 并联机器人机构学理论与控制技术	2
1.2.1 并联机器人机构学理论	3
1.2.2 并联机器人控制技术	5
1.3 国内外研究现状及发展动态分析	7
1.4 本书的目标与主要内容	14
1.4.1 本书目标	14
1.4.2 本书内容安排	14
1.5 本章小结	15
参考文献	15
第 2 章 混合驱动平面五连杆并联机构的动力学与优化设计	22
2.1 引言	22
2.2 混合驱动平面五连杆并联机构运动学分析	23
2.2.1 混合驱动平面五连杆并联机构正运动学分析	23
2.2.2 混合驱动平面五连杆并联机构逆运动学分析	25
2.2.3 运动学分析仿真实例	25
2.3 混合驱动平面五连杆并联机构工作空间分析	27
2.4 混合驱动平面五连杆并联机构的动力学分析	28
2.4.1 混合驱动平面五连杆并联机构构件质心处运动学分析	28
2.4.2 混合驱动平面五连杆并联机构各构件动力学分析	29
2.4.3 混合驱动平面五连杆并联机构动力学模型	31
2.4.4 动力学分析仿真实例	31
2.5 混合驱动平面五连杆并联机构的优化设计	33
2.6 混合驱动平面五连杆并联机构实验平台	36
2.6.1 实验样机	36
2.6.2 实验样机硬件电路设计	37
2.6.3 手动控制器及人机界面设计	41

2.6.4 基于串口通信协议的控制软件设计	42
2.6.5 实验样机运动学验证及结果分析	44
2.7 本章小结	45
参考文献	46
第3章 柔索并联机器人伺服驱动系统动态建模与模糊滑模控制	48
3.1 引言	48
3.2 交流伺服驱动系统的动力学建模	50
3.3 模糊滑模控制器的设计	54
3.3.1 滑模控制器的设计	55
3.3.2 模糊控制器的设计	56
3.4 数值计算结果与分析	57
3.5 本章小结	61
参考文献	62
第4章 混合驱动柔索并联机器人设计分析	64
4.1 引言	64
4.2 混合驱动柔索并联机器人机构设计与研制	66
4.3 混合驱动柔索并联机器人工作空间分析	69
4.3.1 工作空间定义	69
4.3.2 工作空间的约束条件	69
4.3.3 工作空间的确定	72
4.4 混合驱动柔索并联机器人奇异位形分析	73
4.4.1 奇异性条件分析	73
4.4.2 奇异位形的确定	75
4.5 实例仿真分析	76
4.5.1 工作空间算例仿真	76
4.5.2 奇异位形算例仿真	80
4.6 本章小结	83
参考文献	84
第5章 混合驱动柔索并联机器人误差建模与灵敏度分析	86
5.1 引言	86
5.2 混合驱动柔索并联机器人误差建模	87
5.2.1 混合驱动平面五连杆机构的误差模型	88
5.2.2 柔索并联机构的误差模型	90
5.2.3 混合驱动柔索并联机器人的综合误差模型	92
5.3 混合驱动柔索并联机器人灵敏度分析	94

5.3.1 误差的精度预估	95
5.3.2 误差局部灵敏度	95
5.3.3 敏感误差源的识别	96
5.4 数值计算结果与分析	96
5.4.1 误差的精度预估仿真	97
5.4.2 误差局部灵敏度仿真	98
5.4.3 灵敏度系数识别仿真	100
5.5 本章小结	102
参考文献	102
第6章 混合驱动柔索并联机器人动力学分析	104
6.1 引言	104
6.2 混合驱动柔索并联机器人系统描述	104
6.3 混合驱动柔索并联机器人动力学分析	107
6.4 计算实例	111
6.5 本章小结	115
参考文献	116
第7章 混合驱动柔索并联机器人轨迹跟踪控制	117
7.1 引言	117
7.2 混合驱动柔索并联机器人控制方案	118
7.3 混合驱动柔索并联机器人控制模型	120
7.4 混合驱动柔索并联机器人控制策略	123
7.4.1 PID 控制器	124
7.4.2 迭代学习控制器	125
7.4.3 模糊自适应控制策略	126
7.5 混合驱动柔索并联机器人跟踪控制仿真	129
7.6 混合驱动柔索并联机器人监控平台	138
7.6.1 系统开发平台及主要功能模块	138
7.6.2 控制界面模块设计	140
7.6.3 数据界面模块设计	143
7.6.4 查询界面模块设计	147
7.7 本章小结	148
参考文献	149
第8章 混合驱动柔索并联机器人系统集成优化设计	152
8.1 引言	152
8.2 混合驱动柔索并联机器人结构系统优化模型	153

8.2.1 设计变量	153
8.2.2 约束条件	154
8.2.3 目标函数	155
8.3 混合驱动柔索并联机器人控制系统优化模型	156
8.4 混合驱动柔索并联机器人系统集成优化模型	157
8.5 多目标优化遗传算法	159
8.6 多目标集成优化数值求解	161
8.7 本章小结	164
参考文献.....	164

第 1 章 绪 论

1.1 工程背景及研究意义

在国务院发布的《国家中长期科学与技术发展规划纲要(2006~2020 年)》中已明确指出要重点研究个性化的智能机器人和人机交互系统。国家自然科学基金委员会工程与材料科学部的《机械工程学科发展战略报告(2011~2020)》中也明确指出密切围绕国际学术前沿,实现机构学从理想机构研究到真实机构研究的转变^[1]。此外,并联机器人机构学是近 20 年来国际机构学的研究热点和学科前沿,也是我国学者在国际上具有重要学术影响的研究领域之一^[2]。面向起重吊装物流作业对象的机构是通过多根柔索索长的协调变化使作业对象在空间运动(图 1.1),其工作特点类似并联机器人,因此可以被看成一种柔索并联机器人。

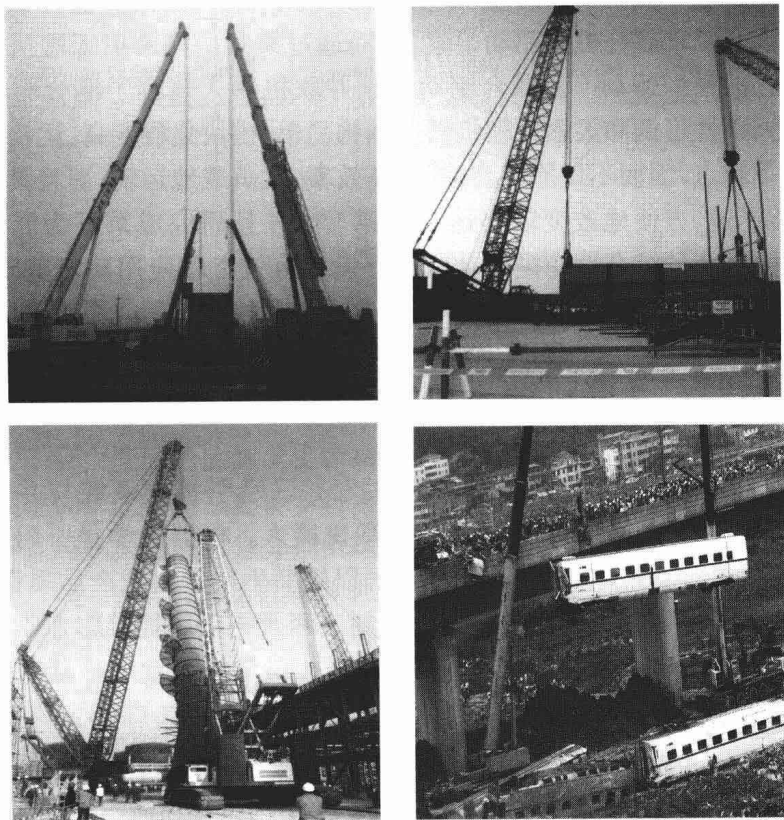


图 1.1 起重吊装柔索并联机构

柔索并联机器人是继串联机器人和并联机器人之后出现的一种新型并联机器人机构,在刚度和工作空间方面,柔索并联机器人介于串联机器人和并联机器人之间。柔索并联机器人采用柔索代替连杆作为并联机器人的牵引元件,因此具有结构简单、工作空间大、易拆装、可重组、模块化程度高、负载能力强、运动速度快以及价格低廉等特点^[3~5]。由于柔索的单向承载特点,柔索并联机器人与一般的并联机器人在机构性能上有质的差异。近年来,受世界经济快速增长和世界贸易不断扩大的影响,柔索并联机器人工程应用日渐增多。例如,各国研究人员纷纷开展这方面的研究工作,研制了用于起重、检测、加工、港口货物吊装、船舶建设、海底打捞、废物清理、石油油井灭火、超大口径射电望远镜跟踪射电源的运动、风洞飞机模型实验等多种用途的柔索并联机器人样机^[6]。因此,对柔索并联机器人的研究具有重要的学术研究价值和实际的工程应用需求。

近年来,随着柔索并联机器人装备机构机械化程度和综合性能的较大提升,以及其在工程项目领域的应用不断扩大,这也对柔索并联机器人提出了更高的要求,不仅能够高精度、高效率、大负载地运转,而且应具有更大的柔性输出,能迅速、方便地改变输出运动规律。然而,由于受到伺服电动机功率和扭矩的限制,目前还无法直接利用伺服电动机驱动大跨度、高负载的柔索并联机器人。混合驱动柔索并联机器人是混合驱动连杆机构驱动柔索,进而通过柔索协调牵引末端执行器实现目标期望轨迹的跟踪运动^[7]。混合驱动柔索并联机器人兼容了混合驱动机构高速、高承载力、柔性可调和柔索并联机器人结构简单、模块化程度高、运动速度快以及价格低廉等特点,因而不仅能够高精度、高效率、大负载地运转,而且具有更大的柔性输出,能迅速、方便地改变输出运动规律^[8,9],并且研究成果可为混合驱动柔索并联机器人系统的综合性能提升、设计、开发和有效工程应用奠定基础,同时也为此类多自由度并联机器人的动态特性、优化设计和控制等研究提供借鉴。

1.2 并联机器人机构学理论与控制技术

从并联机器人的角度来看,混合驱动柔索并联牵引机构系统与并联机器人 Stewart 平台相似,因此可以认为是一种并联机器人。机器人学是一门综合性很强的交叉学科,而机器人主要用于生产活动,以提高生产效率或产品质量,它集中了机械工程、电子工程、计算机工程、自动控制工程及人工智能等多个学科的最新研究成果,代表了机电一体化的最高成就,是当代科学技术发展最活跃的领域之一^[10,11]。另外,它也是一个新兴的科技领域,内容极为丰富、广泛。其中,专业性比较强的有:机器人运动学和动力学,机器人轨迹规划和运动控制,机器人的传感器技术,机器人的编程语言,机器人的智能和任务规划等。机器人动力学是机器人学的重要组成部分,是机器人机构及控制系统设计的基础。

机器人是一种机电一体化的设备,从控制观点来分,机器人系统可以分成四部分:机器人、控制器、环境和任务,如图 1.2(a)所示。图 1.2(b)为其简化形式^[12]。

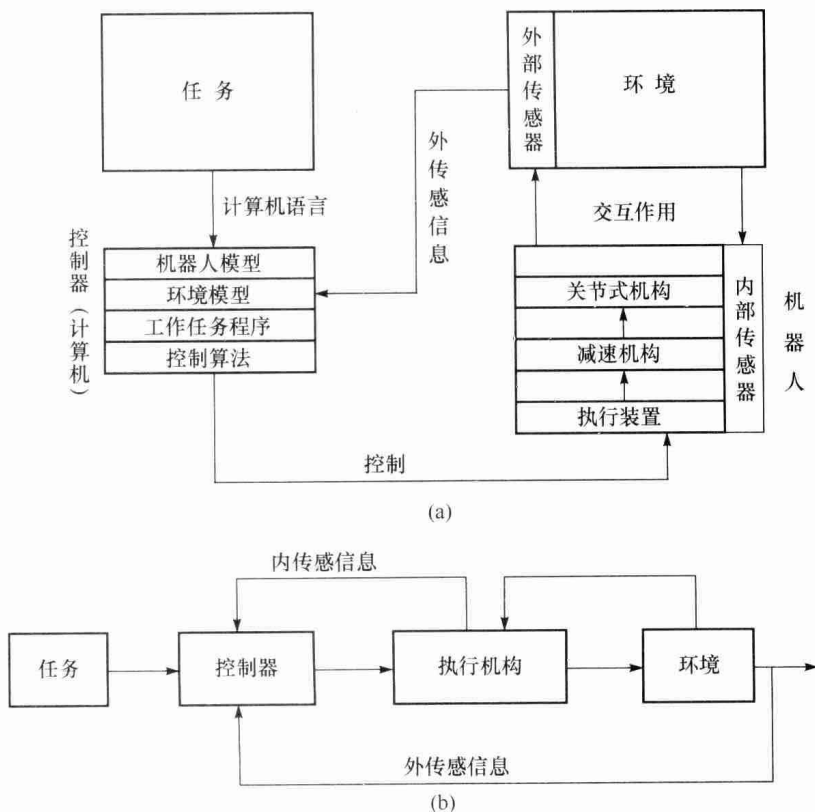


图 1.2 机器人系统基本结构

1.2.1 并联机器人机构学理论

并联机器人是由并联机构而来。1962 年,罗马尼亚人 Gough 采用并联机构设计了一种 6 自由度的轮胎测试机。1965 年,德国人 Stewart 将这种机构作为飞行模拟器用于训练飞行员。这种 6 自由度的并联机构由上下平台及 6 根驱动杆构成,驱动杆可以独立地伸缩,且分别由球铰与上下平台连接,因此,上平台就具有 6 个自由度。1978 年,澳大利亚机构学教授 Hunt 提出将这种 6 自由度的 Stewart 平台机构作为机器人手臂。随着对这种并联机构研究的不断深入,人们将凡是上下平台由两个或两个以上分支相连,机构具有两个或两个以上自由度,且以并联方式驱动机构统称为并联机器人^[13]。并联机器人与串联机器人相比,具有刚度大、结构稳定、承载能力强、精度高、运动惯性小、运动学反解易求和便于实时控制等优点,因而具有广阔的应用前景^[14]。近年来,被广泛应用到航天器对接装置、雷

达定向装置以及虚拟轴高速并联机床等方面。由于其卓越的运动学和动力学性能以及潜在的工业应用前景,吸引了越来越多的世界范围内的众多学者去深入研究。并联机器人机构学理论研究主要包括对并联机器人进行运动学分析、动力学分析、运动控制、路径规划、智能设计以及工程应用等。

机器人运动学是研究物体运动规律,而在研究中不考虑产生运动的力和力矩,它涉及运动物体的位置、速度、加速度和位置变量对时间(或其他变量)的高阶导数。实际上,机器人运动学研究有两类问题:一类是已知机构主动件的位置,求解机构的输出件的位置和姿态,称为位置分析的正解;另一类是若已知输出件的位置和姿态,求解机构输入件的位置,称为机构位置的反解。在串联机器人机构的位置分析中,正解比较容易,而反解比较困难;而在并联机器人机构的位置分析中却正好相反,反解比较简单而正解却十分复杂。这是并联机器人机构分析的特点^[15]。由于并联机构的复杂性,位置正解的难度比较大,其中一种比较有效的方法是采用数值方法求解一组非线性方程组,从而求得与输入位移相对应的受控对象的位置和姿态,数值法的优点是其数学模型比较简单,并且省去了烦琐的数学推导。

机器人动力学主要是研究机器人机构的动力学。机器人机构包括机械结构和驱动装置,它是机器人的本体,也是机器人实现各种功能运动和操作任务的执行机构。机器人的执行机构,在机构学上是一个由多连杆、多自由度的开式运动链(或含局部闭式运动链)构成的,且每个自由度都有驱动的空间机构。在力学上,它是一个复杂的多体系统;在控制上,它是一个多变量的非线性控制系统,一般也是计算机控制系统。对机器人动力学的研究,在机器人一出现就已开始,且随着机器人技术的发展而不断地加以丰富和积累。已知各关节驱动力求末端运动属于机器人动力学正问题;已知末端运动求各关节需要的驱动力属于动力学逆问题。对于机器人设计最具有实际意义的是动力学逆问题,因为它是控制器和机构设计的基本依据。

为了建立机器人机构的动力学模型,可以应用各种力学原理^[16~18]。就目前所看到的有:能量守恒定律、达朗贝尔原理与虚功原理相结合的动静法、拉格朗日方程、牛顿方程、动量矩定理、哈密顿原理、牛顿-欧拉方程、高斯最小“约束”原理、阿沛耳方程、凯恩方程等。而且,对同一机构应用同一原理所得到的模型也往往因为所用的数学工具不同而不一样,可见建立机器人动力学模型的方法之多。在多种机器人动力学建模方法中,具有代表性的三种建模方法是牛顿-欧拉方程、拉格朗日方程和凯恩方程。从运算量比较来看,拉格朗日方程最大,牛顿-欧拉方程次之,凯恩方程最小。牛顿-欧拉法是在向量力学的基础上,用动量定理描述柔性体的移动,用动量矩定理描述柔性体的转动,且这两方面都包含柔性体的变形运动。在用动量(矩)定理列出各分离体的动力学方程之后,再用约束条件消去约束力。该法适合系统中有一个刚性主体的情况。拉格朗日方程法是在虚位移和达朗贝尔原理