

## 摘 要

目前市场上珍珠岩夹芯板坯料的装砌设备陈旧，基本上是人工操作，完全没有实现自动化，这大大降低了生产效率。鉴于此，本文在吸收已有生产设备的特点之上，根据现场的实际空间大小和环境的要求，对坯料装砌机械手进行方案结构设计和分析。

仿真分析可以为机械手的开拓提供更加科学的方法，ADAMS 仿真软件是一个功能强大的建模和仿真环境，它可以对任何机械系统进行建模、仿真、细化及优化设计。可用于预测机械系统的性能, 运动范围, 碰撞检测, 峰值载荷以及计算有限元的输入载荷等。

本文结合本人的设想和已有的成果，主要进行了以下几方面的工作：

首先对坯料装砌机械手进行了其本体结构的分析和设计；然后对其进行了正逆运动学分析，得出了运动学方程，并且通过运动学反解得出了每个关节变量的解；接着对机械手工作空间进行了分析，得出其工作过程可达空间范围；最后在机械系统动力学分析软件 ADAMS 平台上建立了机械手的模型，结合机械手的运动轨迹，根据关节变量的反解得出每个关节对时间的函数。为了分析在运动过程中运动学和动力学特性，应用 measure 和后处理程序对其进行了测量，得出一系列的曲线，观察曲线的变化情况，可以分析出一些规律，基本与实际情况相符，证实本文所做的仿真是成功的。

**关键词：**坯料装砌，正逆运动学，工作空间，ADAMS，仿真分析

## ABSRTACT

The fabricate equipment of perlite board material in the state-of-art is so old, mainly operated manually not automatically, that lower down the productive efficiency. Based on the characters of existing productive equipments, this paper applies a new robot according to the requisitions of space and environment.

Analysis of simulation provides many scientific methods for robotics exploitation. ADAMS simulation software has a strong function in modeling and simulation. It provides modeling, simulation, melting and optimizing design. It is used to forecast capability, motion range, collision detection, peak value load of mechanism system and compute the finite input load.

This paper comprehends my idea and existing fruit, as several aspects of work followed:

Through analysis and design structure of robot, and analysis of positive and athwart kinematics, this paper educes kinematics equation ,as well as solution of joint variation with the kinematics reverse result. This paper then derives vacuum range with the investigation of the work vacuum of robot. Finally, on the basis of building robotics' modeling in ADAMS, according to its track and reverse result, this paper forms the function of time of joints. To analysis kinematics and dynastic trait, this paper uses measure and postprocessor for measurement, consequently it educes series curves, observes curves' change circus, analyzes some rules, and the result is accorded to the fact, verifies the simulation.

**Key Words:** Semifinished materials piled up, positive and athwart kinematics, work vacuum, ADAMS, simulation analysis

此页若属实，请申请人及导师签名。

### 独创性声明

本人声明，所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得武汉理工大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已 在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

研究生签名：周艳华 日期 2007.6.2

### 关于论文使用授权的说明

本人完全了解武汉理工大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留送交论文的复印件，允许论文被查阅和借阅；学校可以公布论文的全部内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。

(保密的论文在解密后应遵守此规定)

研究生签名：周艳华 导师签名：郭红松 日期 07.6.5

注：请将此声明装订在学位论文的目录前。

# 第1章 绪论

## 1.1 研究背景和课题来源

随着国家和国民环保、节能意识的增强，在建筑方面，国家开始对建筑用材有了更多更严的规定；同时人们越来越关注建筑设施的隔音、保温、防火等附加功能，珍珠岩作为传统的建材，由于有着普通建材无法比拟的优势开始广泛应用于建筑装饰市场以代替宝贵的粘土资源。

珍珠岩是一种火山喷发时在一定条件下形成的酸性玻璃质熔岩，属非金属矿物质，具有良好的保温隔热性能及轻质、无毒、多孔的性能，且资源丰富，价格低廉，因此被广泛应用在以下领域：轻质建筑保温板材、内墙隔板、吸音板材等；工业窑炉、管道用保温材；用于啤酒、饮料、食品、医药等助滤剂；用于炼钢过程的集渣材，空气分离设备保冷填充材料；用于橡胶、油漆、塑料、炸药等填充剂、扩张剂。同时以膨胀珍珠岩为基本材料的珍珠岩墙体更是广泛的应用在高层建筑的结构性内外墙体，民用住宅的分户墙、隔墙，工商业建筑大面积的围护墙、保温墙，尤其在冷藏、仓储建筑中使用。其产品优势主要集中在以下几个方面：具有独特的抗震效果；具有独特的保温、隔热、隔音效果；具有独特的防火性能，耐火极限；具有独特的安装电线管道的优势；墙体薄、重量轻、有效地增大使用面积。

钢丝网架整体珍珠岩夹芯板是一种新型墙体材料，它以膨胀珍珠岩为芯材，中间埋设 Z 字形钢形骨架，芯材两面覆以钢丝网片。钢丝网架整体珍珠岩夹芯板可较大幅度减少结构重置，降低基础造价，改善外墙的热工性能，满足住宅结构的防火要求，提高住宅面积利用率，缩短建设工期，减少施工强度，综合造价低。

通过对目前国内市场的调查和国外资料的查询，可以清晰地发现珍珠岩墙体材料的市场潜力是巨大的，同时也是应我国发展绿色墙体材料的进程而生。基于以上的优势以及产品目前在市场上的热销形式，展开对珍珠岩夹芯板坯料装砌机械手研究设计，是以大力发展绿色墙体材料和提高墙体材料制备效率为目的，是以市场需求为第一原则，符合市场经济的发展规律的。

本课题来源于湖北鄂南挺拔新型建材有限公司生产的钢丝网架珍珠岩夹芯板设备项目。该项目需要根据坯料参数，以及各部件的布置来设计坯料装砌机械手，利用机械系统动力学分析软件 ADAMS 对机械手结构进行运动学分析和计算机仿真。

## 1.2 课题研究的目的及意义

目前，国内市场上的珍珠岩夹芯板的制备方法和样式各不相同，但设备陈旧，自动化程度低，生产效率低。所以本设计在吸取已有生产设备优点的基础之上，以新的设计理念，力求将设备的设计做到：新颖，简单适用和经济。使珍珠岩墙体的制备机械达到较高的性价比，以大力提高生产效率，从而促进中国建材市场的进一步改革和完善。

本设计中主要涉及到珍珠岩坯料装砌机械手运动学分析及计算机仿真，运用机械系统动力学分析软件 ADAMS 建立坯料装砌机械手的运动学模型，仿真分析机械手的运动学和动力学特性，改进珍珠岩夹芯板坯料堆放的生产工艺，提高生产效率，创造更大的经济效益。

传统的机械手设计、试验、试制过程中必须边试验边改进，从设计到试验、试制、定型，产品开发成本较高，周期长。运用机械系统动力学分析软件 ADAMS 进行仿真分析及优化设计，可以大大简化机械手设计开发过程，大幅度缩短产品开发周期，减少产品开发费用和成本，明显提高产品质量，提高产品的系统及性能，获得最优化和设计的创新产品。

该课题结合机械手的设计解决运动学及动力学问题，从而提高设计质量。

## 1.3 和本课题有关的国内外研究现状

### 1.3.1 机器人仿真技术国内外研究现状

仿真技术应用于机器人，国外在 70 年代就开始了这一方面的工作。P.N. sheth 和 J.J. Unicker 于 1972 年开发了机构计算机辅助设计和分析系统 IMP, 用来分析闭环机构运动学、静力学、时间滞后及震动分析。随后诞生了 ADAMS (Automatic Dynamic Analysis of Mechanical System)。两者的功能

扩展到对一般机构的动力学仿真。1978年,西德 Warcoke 等人开发了机器人图形仿真程序包 IPA,该软件包含一个 200 种机器人的数据库。法国 Licgois 等人联合开发了一个包括机器人机构设计和动态分析的机器人 CAD 系统。美国 DAUGLAS 公司推出了 McAuto 软件包,用于机器人工作站的设计与动态仿真。John、J.Murray、Charles、P.Numan 等人研制的 ARM 软件包可自动生成机器人操作手末端相对于基座的位置矩阵和完整的拉格朗日动力学模型。

国内机器人仿真的研究总体来说起步较晚,基础较薄弱。国内从 80 年代后期,才开始从事机器人仿真技术的研究。清华大学、浙江大学、沈阳自动化研究所及上海交通大学等做了起步工作,取得了一定成果。南京理工大学于 1994 年用 C 语言开发 ROBSS、ROLOPS 系统,逐渐形成了较完善的机器人仿真系统。刘又午教授等人以底座、大臂、小臂和 3 个腕关节构成的、且每个关节皆为圆柱铰接的典型 6 自由度工业机器人为模型,对通用程序进行了简化,开发出工业机器人动力学分析专用程序。中国农业大学周一鸣教授主持开发了广义机构计算机辅助设计系统 GMCADS (Generalized Mechanisms Computer Aided Design System),该系统用迭代方法计算机械系统的自由度,在静力学分析中用势能极小原理求解系统的静平衡位置,在动力学分析中采用了哈密尔(Hamilton)正则方程。但是,国内的软件都只停留在实验室中,离软件商品化还有很大距离。

### 1.3.2 国内外仿真软件及其相关技术的发展

#### 一、PAMCRASCH 软件

PAMCRASCH 软件是法国 ESI 公司的碰撞模拟有限元仿真分析软件的程序包。它提供了强大的有限元前后处理程序和算法优良的解题器,目前已被各大汽车制造商广泛采用作为碰撞模型有限元仿真的专用平台。

PAMCRASCH 软件提供了运动副单元(Kinematic Joint Elements),非线性六自由度弹性/阻尼单元(Nonlinear 6DOF Spring/Dashpot Elements),PAMCRASCH 软件提供了运动副单元(Kinematic Joint Elements),非线性六自由度弹性/阻尼单元(Nonlinear 6DOF Spring/Dashpot. Elements),焊点结束(Spotweilds)等多种实体(Entities)用于模拟机构各种复杂的运动关系。例如,运动铰单元就有球副(Spherical),滑移副(Translational),转

动副(Revolute), 圆柱副(Cylinder), 平面副(Planar), 万向节副(Universal), 弯曲-扭转副(Flexion-Torsion)以及用户自定义铰(General)八种类型。并且各种类型的运动副自其未受约束的自由度上可以自定义刚度、阻尼、摩擦系数等多种参数。PAMCRASCH 软件有强大的机构运动模拟功能, 它与有限元分析软件相比, 在模拟大变形、大位移时有优越性。

## 二、DADS 软件

比利时 LMS 的 DADS 支持机械系统的快速装配、分析和优化, 并提供了功能虚拟样机技术功能, 可为物理样机试验提供设计的装配特性、功能特性和可靠性的预测与校验分析。在建模方面, 提供的建模元素包括丰富的运动副库、力库、约束库、控制元件库、液压元件库、轮胎接口等。在分析方面, 提供了装配分析、运动学分析、正向动力学分析、逆向动力学分析、静平衡分析、预载荷分析等 6 种分析功能, 并且针对不同的需求, 提供了多种模块, 包括 DADS/Basic (包括基本动力学仿真的建模、求借、后处理和动画功能)、DADS/Standard (基本模块加接触分析、液压与控制分析和用户自定义子程序功能)、DADS/Advanced (包括 DADS 加 DADS/Flex, 后者提供有限元分析借口)、DADS/Plant (提供与控制系统软件 Easy5、Matlab 和 Matrix 耦合的动力学仿真)、DADS/Engine (发动机与动力系统仿真), 以及接口模块 Catia/DADS (与 Catia 接口)、DADS/Pro (与 Pro/E 接口)、DADS/IMS (与 I-DEAS 接口)。

## 三、MATLAB 软件

MATLAB 由美国 MATHWORKS 开发, MATLAB 是当今国际上科学界(尤其是自动控制领域)最具影响力、也是最有活力软件。它起源于矩阵运算, 并已经发展成一种高度集成的计算机语言。它提供了强大的科学运算、灵活的程序设计流程、高质量的图形可视化与界面设计、便捷的与其他程序和语言接口的功能。MATLAB 语言在各国高校与研究单位起着重大作用。在欧美大学里, 诸如应用代数、数理统计、自动控制、数字信号处理、模拟与数字通信、时间序列分析、动态系统仿真等课程的教科书都把 MATLAB 作为内容。在那里, MATLAB 是攻读学位的大学生、硕士生、博士生必须掌握的基本工具。

MATLAB SIMULINK 是一个交互式操作的动态系统建模、仿真、分析集成环境。它的出现使人们有可能考虑许多以前不得不做简化假设的非线性因素、随机因素, 从而大大提高了人们对非线性随机动态系统的认知能力。

MATLAB 主要应用于电学、自动控制、工程运算。它可以与其它机械系统

仿真软件（如 DADS、ADAMS 等）一起联合组成仿真系统。

#### 四、ADAAMS 软件

ADAMS (Automatic Dynamic Analysis of Mechanical System) 软件, 是由美国机械动力公司 (Mechanical Dynamics Inc.) 开发的最优秀的机械系统动态仿真软件, 是世界上最具有权威性的, 使用范围最广的机械系统动力学分析软件。在当今动力学分析软件市场上 ADAMS 独占鳌头, 拥有 70% 的市场份额, ADAMS 拥有 Windows 版和 Unix 两个版本, 目前最高版本为 ADAMS 2005。

ADAMS 软件使用交互式图形环境和零件库、约束库、力库, 创建完全参数化的机械系统几何模型, 其求解器采用多刚体系统动力学理论中的拉格朗日方程方法, 建立系统动力学方程, 对虚拟机械系统进行静力学、运动学和动力学仿真, 输出位移、速度、加速度和反作用力曲线。ADAMS 软件的仿真可用于预测机械系统的性能、运动范围、碰撞检测、峰值载荷以及计算有限元的输入载荷等。

ADAMS 一方面是机械系统动态仿真软件的应用软件, 用户可以运用该软件非常方便地对虚拟样机进行静力学、运动学和动力学分析。另一方面, 又是机械系统动态仿真分析开发工具, 其开放性的程序结构和多种接口, 可以成为特殊行业用户进行特殊类型机械系统动态仿真分析的二次开发工具平台。

ADAMS 软件包括 3 个最基本的解题程序模块: ADAMS/View (基本环境)、ADAMS/Solver (求解器) 和 ADAMS/Postprocessor (后处理)。另外还有一些特殊场合应用的附加程序模块, 例如: ADAMS/Car (轿车模块)、ADAMS/Rail (机车模块)、ADAMS/Driver (驾驶员模块)、ADAMS/Tire (轮胎模块)、ADAMS/Linear (线性模块)、ADAMS/Flex (柔性模块)、ADAMS/Controls (控制模块)、ADAMS/FEA (有限元模块)、ADAMS/Hydraulics (液压模块)、ADAMS/Exchange (接口模块)、Mechanism/Fro (与 Pro/Engineer 的接口模块)、ADAMS/Animation (高速动画模块) 等。

## 1.4 本论文研究的主要内容

经过系统学习机械手技术的知识, 查阅大量的文献资料, 对国内外的机器人的现状有了比较详细的了解。在此基础上, 结合本人的设想, 和设计工作中需要解决的任务, 主要进行以下几项工作:



- (1) 进行坯料装砌机械手本体结构的方案创成和分析；
- (2) 进行机械手运动学分析，推算运动方程的正逆解；
- (3) 分析机械手操作臂的工作空间；
- (4) 利用机械系统动力学分析软件 ADAMS 对简化后的操作臂模型进行运动学仿真。

## 第2章 机械手方案的创成和机械结构的设计

### 2.1 机械手机械设计的特点

串联机械手机械设计与一般的机械设计相比,有很多不同之处。首先,从机构学的角度来看,机械手的结构是由一系列连杆通过旋转关节(或移动关节)连接起来的开式运动链。开链结构使得机械手的运动分析和静力分析复杂,两相邻杆件坐标系之间的位姿关系、末端执行器的位姿与各关节变量之间的关系、末端执行器的受力和各关节驱动力矩(或力)之间的关系等,都不是一般机构分析方法能解决得了的,需要建立一套针对空间开链机构的运动学、静力学方法。末端执行器的位置、速度、加速度和各个关节驱动力矩之间的关系是动力学分析的主要内容。

其次,由于开链机构相当于一系列悬臂杆件串联在一起,机械误差和弹性变形的累积使机器人的刚度和精度大受影响。因此在进行机械手机械设计时特别要注意刚度和精度设计。

再次,机械手是典型的机电一体化产品,在进行结构设计时必须考虑到驱动、控制等方面的问题,这和一般的机械产品设计是不同的。

另外,与一般机械产品相比,机械手的机械设计在结构的紧凑性、灵巧性方面有更高的要求。

### 2.2 与机械手有关的概念<sup>[1][2]</sup>

1. 自由度:机械手一般都多关节的空间机构,其运动副通常有移动副和转动副两种。相应地,以转动副相连的关节称为转动关节。以移动副相连的关节称为移动关节。在这些关节中,单独驱动的关节称为主动关节。主动关节的数目称为机械手的自由度。

#### 2. 机械手的坐标形式

机械手由于用途广泛,种类繁多,结构上也多种多样,根据本体结构坐标系的特点来分类,大体上分为:

(1) 直角坐标型 这种机械手具有三个互相垂直的移动轴线，他们通过手臂的上下、左右移动和前后伸缩构成一个直角坐标系。其手腕能摆动和旋转。这种机械手的机械结构和控制方式比较简单，精度较高，但操作范围小，运动速度较低，而且其适应性比较差。

(2) 圆柱坐标型 该型机械手前三个关节为两个移动关节和一个转动关节，以 $\theta, r, z$ 为坐标，位置函数为 $P = f(\theta, r, z)$ ，其中， $r$ 是手臂径向长度， $z$ 是垂直方向的位移， $\theta$ 是手臂绕垂直轴的角位移。这种形式的机器人占用空间小，结构简单。

(3) 球坐标型 具有两个转动关节和一个移动关节。以 $\theta, \phi, y$ 为坐标，位置函数为 $P = f(\theta, \phi, y)$ ，该型机器人的优点是灵活性好，占地面积小，但刚度、精度较差。

(4) 关节坐标型 有垂直关节型和水平关节型(SCARA 型)机械手，前三个关节都是回转关节，特点是动作灵活，工作空间大，占地面积小，缺点是刚度和精度较差。

## 2.3 方案设计

### 2.3.1 方案要求

该机械手是针对鄂南新型建材有限公司生产的钢丝网架珍珠岩夹芯板设备中的坯料装砌要求来进行的。根据现场的实际需要，设计的具体要求为：

(1) 抓取对象为珍珠岩坯料，抓取的坯料截面积为 $50 \times 50 \text{mm}^2$ ，长度为 $1\text{m}$ ，重量为 $0.75\text{kg}$ 。

(2) 抓取和放下的时间尽可能短。

(3) 从输送带上抓取坯料，装砌于料框内，装砌的方式如图 2-1，其中料框内空长 $3\text{m}$ ，高 $24$ 层，且各层之间放置一块桁架片。坯料装砌时采用 $3, 4, 3$ 的方式，以达到更好的稳定性。

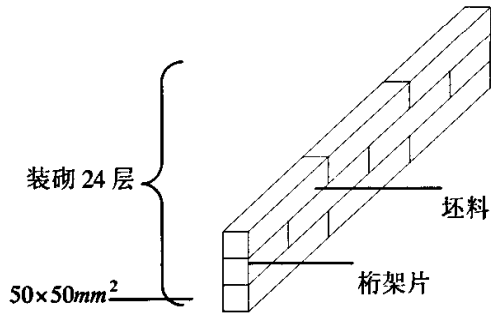


图 2-1 坯料装砌方式

### 2.3.2 机械手自由度的分配<sup>[3][4]</sup>

本课题要求机械手臂能达到工作空间的任意位置和姿态，同时考虑到坯料的长度为 1m，采用单臂机械手进行夹持和堆放，其中手爪的横向尺寸为 250mm。综合考虑后确定该机械手具有三个自由度，且均为转动自由度，其中手臂两个自由度。确定其结构形式如图 2-2。

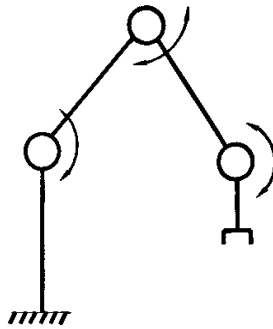


图 2-2 该型机械手构型

前两个关节决定了末端执行器在空间的位置，后一关节决定了末端执行器在空间的姿态。

### 2.3.3 方案描述

由于装砌坯料的料框内空长 3m，并且 3m 的空间内要放满坯料，所以把该

机械手安置在一滑道上，该机械手可以实现水平方向单自由度的运动，在滑道上滑行到需要堆放坯料位置的面前，很方便地把料运送到料框内。因此，该机械手具有运动自由灵活的特点。

机械手本体由机座、大臂、小臂、手腕、末端执行器和驱动装置组成。该机械手共有三个自由度，依次为大臂俯仰、小臂俯仰、手腕俯仰。

参考同类机械手的性能参数，进行主尺寸和运动范围的确定，考虑到机构可行前提下有尽可能大的作业范围。根据设计的要求及其使用的范围，定出该型机械手的主要性能参数如表 2-1 所示。其中  $\theta_1$  代表大臂俯仰， $\theta_2$  代表小臂俯仰， $\theta_3$  代表腕起/落。

表 2-1 机械手的主要尺寸及性能参数

| 肩高<br>(mm) | 自 由 度              |                       |                       | 大臂长<br>度 (mm) | 小臂长<br>度 (mm) | 腕部长<br>度 (mm) |
|------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|---------------|---------------|---------------|
|            | $\theta_1$         | $\theta_2$            | $\theta_3$            |               |               |               |
| 800        | $0^\circ-90^\circ$ | $225^\circ-315^\circ$ | $180^\circ-270^\circ$ | 850           | 900           | 100           |

### 2.3.4 方案结构设计与分析

该机械手的本体组成如图 2-3。

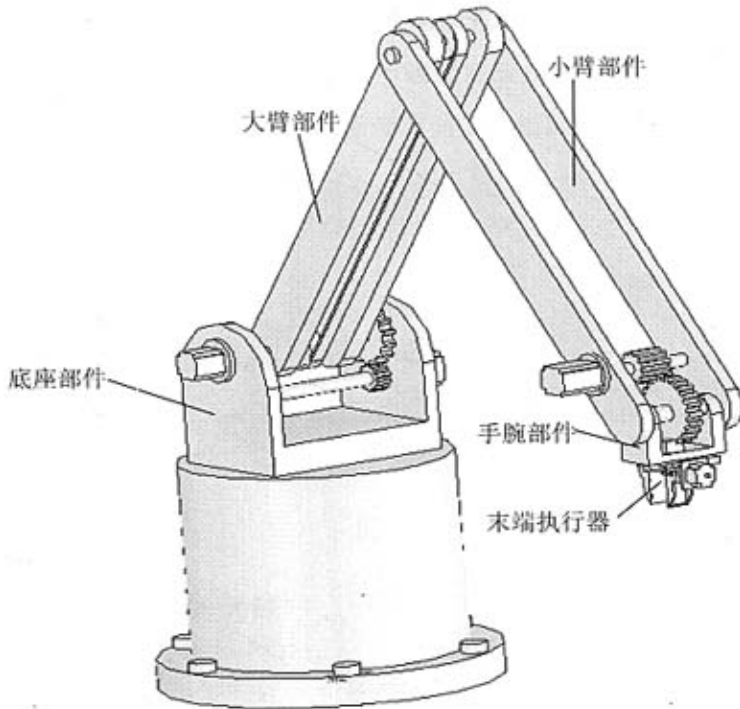


图 2-3 坯料装砌机械手本体组成

各部件组成和功能描述如下：

(1)底座部件：

底座部件包括底座、传动部件、步进电机等。作用是支承大臂部件。在底座支架上固定着驱动大臂俯仰和小臂俯仰的电机。

(2)大臂部件：包括大臂和传动部件。

(3)小臂部件：包括小臂、传动部件、传动轴等，在小臂一端固定驱动手腕运动的步进电机。

(4)手腕部件：包括手腕壳体、传动齿轮和传动轴、机械接口等。

(5)末端执行器：

因为抓取的坯料形状为长方体，截面积为  $50 \times 50 \text{mm}^2$ ，长度为 1m，所以末端执行器设计得开合范围 0~52mm。考虑在指尖的平面上贴传感器片，进行力的

控制。设计了手爪，如图 2-4。手爪采用直流电动机驱动，平行开合结构。并且采用左右旋螺杆，同一根螺杆一端为左旋螺纹，另一端为螺距相同的右旋螺纹，当螺杆转动时，两只螺母带动两个手指同时开合，燕尾导轨定向。

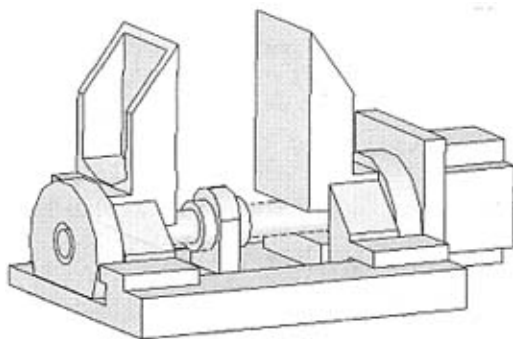


图 2-4 手爪设计图

### 2.3.5 驱动方式的选择

机器人采用电动机驱动。这种驱动方式具有结构简单、易于控制、使用维修方便、不污染环境等优点，这也是现代机械手应用最多的驱动方式。

为实现机械手灵活自由地移动，驱动系统使用了交流电源供电。电动机可以选择步进电机或直流伺服电机。使用直流伺服电机能构成闭环控制，精度高，额定转速高，但价格较高，而步进电机驱动具有成本低，控制系统简单的优点。确定该机械手的 3 个关节都采用步进电机驱动，开环控制。

在现代机械手结构中广泛使用着各种轴承，常用的有环形轴承和交叉滚子轴承。这几种机械手专用轴承具有结构简单紧凑，精度高、刚度大，承载能力强(可承受径向力、轴向力、倾覆力矩)和安装方便等优点。但考虑到这些轴承价格昂贵，而使用普通的球轴承或滚子轴承也能满足结构的需要，所以在该机械手的结构中仍然全部采用球轴承。

在电机的布置上，考虑尽量将电机放置在相应的操作臂的前端，这样可以减小扭矩，同时也可以起到重力平衡的作用，但同时尽量避免过长的传动链，以简化结构，减少诱导运动。

### 2.3.6 传动系统设计<sup>[5][6]</sup>

传动装置的作用主要是将驱动元件的动力传递给机械手相应的执行部件，以实现各种预定的运动。目前常用的传动方式有：皮带轮传动、链条传动、齿轮齿条传动、蜗轮蜗杆传动、行星齿轮传动、谐波减速传动以及螺旋传动等。波齿轮传动具有体积小、结构紧凑、效率高、能获得大的传动比等优点，但存在扭转刚度较低且传动比不能太小的缺点。行星齿轮传动具有结构紧凑、效率高的优点是用于中等减速比传动，但存在齿轮间隙，难以实现正反过程中精确位置要求，因此限制了它的广泛应用。蜗轮蜗杆机构常用于要求有大的传动比且传动过程中要求机构自锁的场合，这种方式安全性能高，但同样存在齿侧间隙，而且效率较低。皮带轮传动可以实现过载保护，可是存在弹性滑动，和链传动一样使用一段时间后易松弛，传动运转过程中还产生动载荷，因此，二者常用于传动精度要求不高的场合。滚珠丝杠传动具有传动效率高、摩擦阻力小、运转平稳且能够有效消除传动间隙，无传动“爬行”现象和不自锁等优点，但是价格较高。因此滚珠丝杠螺母被广泛应用于要求较高的数控传动系统中。另外，在数控传动系统中，同步齿形带传动由于其具有稳定的工作性能也得到了广泛的应用。

在本设计中，采用齿轮机构来传递驱动电机输出的扭矩，通过齿轮传动系统将扭矩传递到关节 1，用同步带传动来实现由步进电机输出的扭矩到关节 2。

## 2.4 本章小结

本章对机械手的结构进行了设计，包括自由度的分配，连杆基本的特性参数，系统的组成结构和功能描述，系统传动结构，驱动结构都做了简要的概述。



## 第3章 坯料装砌机械手的运动学分析

### 3.1 引言

机械手的运动学主要是把机械手相对于固定参考系的运动作为时间的函数进行分析研究，而不考虑引起这些运动的力和力矩，也就是要把机器人的空间位移解析地表示为时间的函数，特别是要研究关节变量和机械手末端执行器位置和姿态之间的关系。主要有以下两个基本问题：

1) 对一给定的机械手，已知连杆参数和关节变量，求末端执行器相对于参考坐标系的位置和姿态。参考坐标系为固定在大地上的笛卡尔坐标系。这常称作运动学正问题。

2) 已知机械手连杆的几何参数，给定末端执行器相对于参考坐标系的位置和姿态，确定关节变量的大小。这个问题称为运动学逆问题。

机械手臂的关节变量是独立变量，而末端执行器的作业通常在参考坐标系中说明。根据末端执行器在参考坐标系中的位置和姿态来确定相应各关节变量要进行运动学逆问题的求解。机械手运动学逆问题是机械手运动学分析中的关键。

### 3.2 数学基础

在空间中，要确定一个物体的几何状态需要确定其3个位移坐标(或称位置自由度)和3个旋转坐标(或称姿态自由度)。在机械手术语中，将一个空间物体的上述6个自由度状态称为该物体的位姿。

#### 3.2.1 位置的描述<sup>[7][8]</sup>

描述物体间关系时，一旦建立了一个坐标系，就能用某个 $3 \times 1$ 位置矢量来确定该空间内任意点的位置。对于直角坐标系 $O_{Axyz}$ 和 $O_{Buvw}$ ，空间任意一点P的位置可分别用 $3 \times 1$ 的列矢量 ${}^A P$ 和 ${}^B P$ 表示，其中， $p_x, p_y, p_z$ 是点P在坐标系 $O_{Axyz}$

中的三个坐标分量： $p_u, p_v, p_w$  是点 P 在坐标系  $O_{Buvw}$  中的三个坐标分量。我们称  ${}^A P$  和  ${}^B P$  为位置矢量，上标分别代表相应的参考坐标系。如式 (3-1) 所示。

$${}^A P = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix}, \quad {}^B P = \begin{bmatrix} p_u \\ p_v \\ p_w \end{bmatrix} \quad (3-1)$$

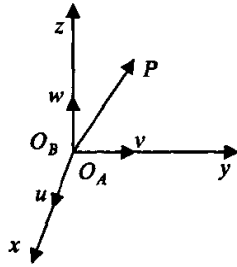


图 3-1 位置矢量的表示

### 3.2.2 姿态方位的描述<sup>[9][10]</sup>

在研究机械手的运动与操作时，不仅要表示空间某点的位置，而且要表示物体的姿态。物体的姿态可由某个固接于此物体的坐标系描述。设参考坐标系  $O_{Axyz}$  是三维空间中的固定坐标系，而  $O_{Buvw}$  是运动坐标系，如图 3.1 所示。运动坐标系同刚体 B 固接，并随它一起运动。刚体上有点 P，当坐标系  $O_{Buvw}$  绕任一轴线转动后，均可通过一个  $3 \times 3$  旋转矩阵 R 将原坐标  ${}^B P$  变换到参考坐标系中的坐标  ${}^A P$ 。即

$${}^A P = R {}^B P \quad (3-2)$$

由矢量分量的定义有：

$${}^B P = p_u i_u + p_v j_v + p_w k_w \quad (3-3)$$

利用标量积的定义和 (3-3) 式可知：

$$\begin{aligned} p_x &= i_x \cdot {}^B P = i_x \cdot i_u p_u + i_x \cdot j_v p_v + i_x \cdot k_w p_w \\ p_y &= j_y \cdot {}^B P = j_y \cdot i_u p_u + j_y \cdot j_v p_v + j_y \cdot k_w p_w \\ p_z &= k_z \cdot {}^B P = k_z \cdot i_u p_u + k_z \cdot j_v p_v + k_z \cdot k_w p_w \end{aligned} \quad (3-4)$$

比较式 (3-2) 和式 (3-4), 有

$$R = \begin{bmatrix} i_x \cdot i_u & i_x \cdot j_v & i_x \cdot k_w \\ j_y \cdot i_u & j_y \cdot j_v & j_y \cdot k_w \\ k_z \cdot i_u & k_z \cdot j_v & k_z \cdot k_w \end{bmatrix} \quad (3-5)$$

如果  $O_{Buvw}$  坐标系绕  $O_Ax$  轴转动  $\theta$  角, 变换矩阵  $R(x, \theta)$  称为绕  $O_Ax$  轴旋转  $\theta$  角的旋转矩阵, 它由上述变换矩阵概念导出, 即

$$R(x, \theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3-6)$$

类似的, 绕  $O_Ay$  轴转动  $\theta$  角和绕  $O_Az$  轴转动  $\theta$  角的  $3 \times 3$  旋转矩阵分别为:

$$R(y, \theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix}, \quad R(z, \theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-7)$$

### 3.2.3 齐次坐标变换

齐次坐标是用  $n+1$  维坐标来描述  $n$  维空间中的位置, 其第  $n+1$  个分量(元素)称为比例因子。引入齐次坐标不仅对坐标变换的数学表达带来方便, 而且具有坐标值缩放功能。对三维空间位置矢量  $P = (p_x, p_y, p_z)^T$ , 其齐次坐标可以表示为  $P = (\omega p_x, \omega p_y, \omega p_z, \omega)^T$ 。实际坐标和齐次坐标的关系如下:

$$p_x = \frac{\omega p_x}{\omega}, \quad p_y = \frac{\omega p_y}{\omega}, \quad p_z = \frac{\omega p_z}{\omega} \quad (3-8)$$

三维空间的位置矢量的齐次坐标表达并不是唯一的。但若将  $\omega$  取为 1, 则位置矢量变换后的齐次坐标和矢量的实际坐标就相同了。在机械手的应用中  $\omega$  总是取为 1。齐次变换矩阵是  $4 \times 4$  矩阵, 它能将一个以齐次坐标表示的位置矢量由一个坐标系映射到另一个坐标系。在机械手系统的运动分析中, 齐次变换矩阵  $T$  写成以下形式:

$$T = \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & P_{3 \times 1} \\ 0_{1 \times 3} & I_{1 \times 1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{旋转矩阵}_{3 \times 3} & \text{位置矢量}_{3 \times 1} \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \quad (3-9)$$

用齐次变换矩阵的方式, 可将式 (3-6) 和式 (3-7) 绕  $x, y, z$  轴的转动表示

为:

$$\begin{aligned}
 Rot(x, \theta) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\
 Rot(y, \theta) &= \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\
 Rot(z, \theta) &= \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.
 \end{aligned} \tag{3-10}$$

式中的符号  $Rot$  为表示转动的齐次变换矩阵, 括号中的第一个变量表示转轴, 第二个变量表示转动角。

齐次平移矩阵  $Trans(d_x, d_y, d_z)$  使坐标系  $O_{B_{uvw}}$  的原点平移到参考坐标系的  $(d_x, d_y, d_z)^T$  点, 而保持坐标轴平行。式中符号  $Trans$  表示移动的齐次变换矩阵, 括号里的  $d_x, d_y, d_z$  分别表示沿轴  $x, y, z$  所移动的距离。

$$Trans(d_x, d_y, d_z) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_x \\ 0 & 1 & 0 & d_y \\ 0 & 0 & 1 & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3-11}$$

### 3.3 机械手的位姿分析<sup>[11][12][13][14]</sup>

#### 3.3.1 机械手的手坐标系

描述机械手手部(也称为末端执行器, 通常称为手部)的位姿, 它的位置和方向的坐标系的原点在手部某点, 用一个向量  $p$  表示, 用三个单位向量  $n, o$  和  $a$  描述机械手的姿态。当手部处于初始位置和方位时,  $z$  向矢量处于手接近物体的方向上, 并称为接近矢量  $a$ 。 $y$  向矢量处于规定手方向上, 称作方位矢量  $o$ 。最

后一个单位向量称作正交向量  $n$ , 其方向和大小由  $n = o \times a$  所确定。因此, 对 6 自由度机械手来说, 从手坐标系到参考坐标系  $\{0\}$  的变换矩阵  $T_6$  具有下列元素,

$$T_6 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-12)$$

### 3.3.2 连杆坐标系的确立

机械手是由一系列通过活动关节连接在一起的连杆所组成。一个  $n$  自由度的机器人, 有  $n$  个连杆和  $n$  个关节。基座是连杆 0, 它不包括在  $n$  个连杆中。第一个运动体是连杆 1, 以此类推, 最后一个连杆与手相连; 关节  $i$  处于连杆  $i$  和  $i-1$  之间, 每个连杆至多与另外两个连杆相连, 形成一个开式运动链。

任何一个两端带有关节  $i$  和关节  $i+1$  的连杆  $i$ , 都可以用两个量来描述: 一个是两关节轴线的公共垂线间距离  $a_i$ , 另一个是垂直于  $a_i$  的平面上两个轴的夹角  $\alpha_i$ 。习惯上称  $a_i$  为连杆长度,  $\alpha_i$  为连杆的扭转角, 如图 3-2 所示。两个这样相连的连杆的相对位置用  $d_i$  和  $\theta_i$  来确定。 $d_i$  是沿着第  $i$  关节轴线两个垂线的距离,  $\theta_i$  是在垂直于这个关节轴的平面上两个被测垂线之间的夹角。 $d_i$  和  $\theta_i$  分别称为连杆之间的距离及夹角。在转动关节中(见图 3-2),  $\theta_i$  是关节变量,  $a_i$ ,  $\alpha_i$  和  $d_i$  是结构参数; 在移动关节中(见图 3-3),  $d_i$  是关节变量,  $a_i$ ,  $\alpha_i$  和  $\theta_i$  是结构参数。与转动关节不同, 移动关节的轴  $n$  方向被确定了, 但在空间的位置并没确定, 此时连杆长度  $a_i$  没有意义, 所以被定义为零。坐标系原点是与下一个连杆确定的原点相重合。连杆  $i$  的  $z_i$  轴与连杆  $i+1$  的关节轴在同一直线上。 $x_i$  轴平行或逆平行移动关节的方向与  $z_i$  轴的矢量积。当  $d_i = 0$  时, 我们定义为零位。

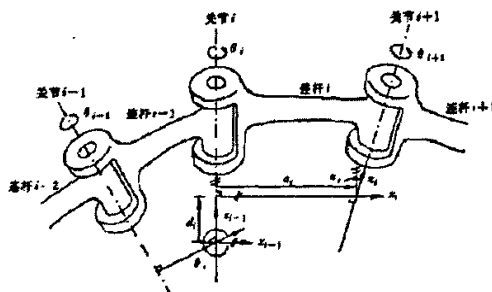


图 3-2 转动关节连杆参数示意图

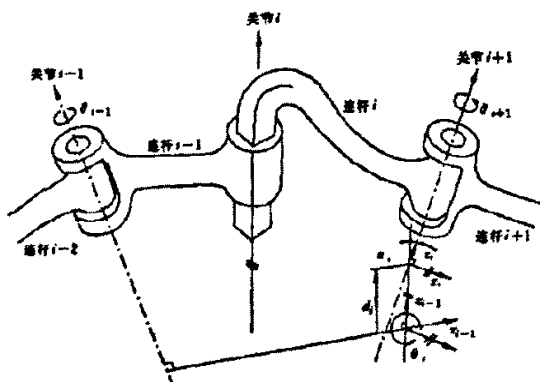


图 3-3 移动关节连杆参数示意图

为描述相邻连杆间平移和转动的关系。Denavit 和 Hatenberg 在 1955 年提出了一种为关节链中的每一个连杆建立附体坐标系的矩阵方法，简称 D-H 法。D-H 法在每个关节处为连杆建立连杆坐标系，用  $4 \times 4$  齐次变换矩阵表示它与前一连杆坐标系的关系。

#### 1) 建立坐标系

$n$  关节机械手需建立  $n+1$  个坐标系，其中参考(基座)坐标系为  $O_0x_0y_0z_0$ ，手部坐标系为  $O_nx_ny_nz_n$ ，第  $i$  关节上的坐标系为  $O_{i-1}x_{i-1}y_{i-1}z_{i-1}$ 。确定和建立每个坐标系应根据下面 3 条规则(参见图 3-2)：

- ①  $z_{i-1}$  轴沿着第  $i$  关节的运动轴，
- ②  $x_i$  轴垂直于  $z_{i-1}$  轴和  $z_i$  轴并指向离开  $z_{i-1}$  轴的方向，
- ③  $y_i$  轴按右手坐标系的要求建立。

按照这些规定，第 0 号坐标系在基座上的位置和方向可任选，只要  $z_0$  轴沿着第 1 关节运动轴。第  $n$  坐标系可放在手的任何部位，只要  $x_n$  轴与  $z_{n-1}$  轴垂直。

#### 2) 几何参数定义

根据上述对连杆参数及坐标系的定义，描述串联机器人相邻关节坐标系之间的关节关系可归结为如下 4 个参数：

- $\theta_i$ ：绕  $z_{i-1}$  轴(右手定则)由  $x_{i-1}$  轴向  $x_i$  轴的关节角。
- $d_i$ ：从第  $i-1$  坐标系的原点到  $z_{i-1}$  轴和  $x_i$  轴的交点沿  $z_{i-1}$  轴的距离。
- $a_i$ ：从第  $z_{i-1}$  和  $x_i$  的交点到第  $i$  坐标系的原点沿  $x_i$  轴的偏离距离(或者说，是  $z_{i-1}$  和  $z_i$  两轴间的最小距离)。
- $\alpha_i$ ：绕  $x_i$  轴(右手定则)由  $z_{i-1}$  轴转向  $z_i$  轴的偏角。

### 3) 建立 $i$ 坐标系和 $i-1$ 坐标系的齐次变换矩阵

一旦对全部连杆规定坐标系后, 就能够按照下列顺序由两个旋转和三个平移来建立相邻两连杆  $i-1$  和  $i$  之间的相对关系。

①  $Rot(z_{i-1}, \theta_i)$  将坐标系  $O_{i-1}x_{i-1}y_{i-1}z_{i-1}$  绕  $z_{i-1}$  轴转  $\theta_i$  角, 使  $x_{i-1}$  轴与  $x_i$  轴平行并指向同一方向;

②  $Trans(z_{i-1}, d_i)$  将坐标系  $O_{i-1}x_{i-1}y_{i-1}z_{i-1}$  沿  $z_{i-1}$  轴平移距离  $d_i$ , 使  $x_{i-1}$  轴与  $x_i$  轴重合;

③  $Trans(x_i, a_i)$  将坐标系  $O_{i-1}x_{i-1}y_{i-1}z_{i-1}$  沿旋转后的  $x_{i-1}$  轴即  $x_i$  轴平移距离  $a_i$ , 使两坐标系的原点重合;

④  $Trans(y_{i-1}, b_i)$  若  $z_{i-1}$  轴与  $x_i$  轴不相交, 第③步不能使坐标系  $O_{i-1}x_{i-1}y_{i-1}z_{i-1}$  和坐标系  $O_ix_iy_iz_i$  的原点一致, 则这一步是必要的。将坐标系  $O_{i-1}x_{i-1}y_{i-1}z_{i-1}$  的原点沿旋转后  $y_{i-1}$  的平移距离  $b_i$ , 使两坐标系的原点重合;

⑤  $Rot(x_i, \alpha_i)$  将坐标系  $O_{i-1}x_{i-1}y_{i-1}z_{i-1}$  沿  $x_i$  轴转  $\alpha_i$  角, 使两坐标系完全重合。

对于  $b_i = 0$  的情况,  $Trans(y_{i-1}, b_i)$  是  $4 \times 4$  单位矩阵, 与原来的 D-H 变换矩阵实质相同。这样, 坐标系  $O_{i-1}x_{i-1}y_{i-1}z_{i-1}$  (也可称为坐标系  $\{i-1\}$ ) 和  $O_ix_iz_i$  (也可称为坐标系  $\{i\}$ ) 的齐次变换矩阵  $A_i$  可以根据矩阵的合成规则得到,  $A_i$  称为坐标系  $\{i\}$  和坐标系  $\{i-1\}$  的 D-H 变换矩阵。即

$$A_i = Rot(z_{i-1}, \theta_i)Trans(z_{i-1}, d_i)Trans(x_i, a_i)Trans(y_{i-1}, b_i)Rot(x_i, \alpha_i)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i - b_i \sin \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i + b_i \cos \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-13)$$

利用适当数量的该矩阵乘积, 就可以描述具有任意复杂程度的连杆坐标系系统之间的变换。例如, 6 连杆机械手的末端即为连杆 6 的坐标系  $\{6\}$ , 它与连杆  $i-1$  的坐标系  $\{i-1\}$  的变换关系  $T_6^{i-1}$  可以表示为:

$$T_6^{i-1} = A_i A_{i+1} \Lambda A_6 \quad (3-14)$$

而末端坐标系  $\{6\}$  对参考坐标系  $\{0\}$  的总变换关系  $T_6$  (如果参照坐标系是坐标系  $\{0\}$ , 可省略上标) 可表示为:

$$T_6 = A_1 A_2 A_3 A_4 A_5 A_6 \quad (3-15)$$

### 3.3.3 坯料装砌机械手运动学正问题<sup>[15][16][17][8]</sup>

按照上述方法建立坯料装砌机械手各个连杆的坐标系，如图 3-4 所示。

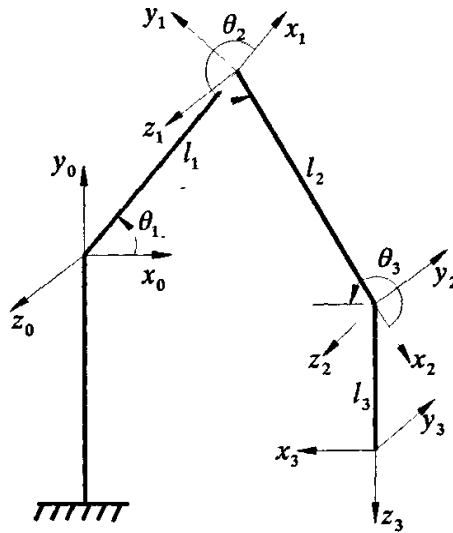


图 3-4 机械手连杆坐标系

下面列出图 3-4 所示坯料装砌机械手各连杆及关节参数，如表 3-1 所示。

表 3-1 坯料装砌机械手的连杆及关节参数

| 构件编号 | $\theta$   | $\theta$ 范围                | $\alpha_i$  | $a_i$ | $d_i$ | $b_i$ | $\cos \alpha_i$ | $\sin \alpha_i$ |
|------|------------|----------------------------|-------------|-------|-------|-------|-----------------|-----------------|
| 1    | $\theta_1$ | $0^\circ \sim 90^\circ$    | 0           | $l_1$ | 0     | 0     | 1               | 0               |
| 2    | $\theta_2$ | $225^\circ \sim 315^\circ$ | 0           | $l_2$ | 0     | 0     | 1               | 0               |
| 3    | $\theta_3$ | $180^\circ \sim 270^\circ$ | $-90^\circ$ | 0     | 0     | $l_3$ | 0               | -1              |

将表 3-1 中的参数分别代入式 (3-13) 可得到如下矩阵 (为简化计算，下面约定  $c_i = \cos \theta_i$ ,  $s_i = \sin \theta_i$ )。

$$A_1 = \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & l_1 c_1 \\ s_1 & c_1 & 0 & l_1 s_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad A_2 = \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & l_2 c_2 \\ s_2 & c_2 & 0 & l_2 s_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad A_3 = \begin{bmatrix} c_3 & 0 & -s_3 & -l_3 s_3 \\ s_3 & 0 & c_3 & l_3 c_3 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



由手坐标系逐一向参考坐标系变换（为简化计算，下面约定  
 $c_{ij} = \cos(\theta_i + \vartheta_j)$ ,  $s_{ij} = \sin(\vartheta_i + \theta_j)$ ,  $c_{ijk} = \cos(\theta_i + \theta_j + \theta_k)$ ,  $s_{ijk} = \sin(\theta_i + \theta_j + \theta_k)$ )  
 其过程如下：

$$T_3^1 = A_2 A_3 = \begin{bmatrix} c_{23} & 0 & -s_{23} & -l_3 s_{23} + l_2 c_2 \\ s_{23} & 0 & c_{23} & l_3 c_{23} + l_2 s_2 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_3^0 = A_1 A_2 A_3 = A_1 T_3^1 = \begin{bmatrix} c_{123} & 0 & -s_{123} & -l_3 s_{123} + l_2 c_{12} + l_1 c_1 \\ s_{123} & 0 & c_{123} & l_3 c_{123} + l_2 s_{12} + l_1 s_1 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-16)$$

式 (3-16) 表示坯料装砌机械手的手臂变换矩阵  $T_3^0$ ，它描述末端连杆坐标系 {3} 相对于基坐标系 {0} 的位姿，是操作臂运动分析和综合的基础。

### 3.4 机械手运动学逆问题<sup>[19][20]</sup>

在对机械手进行运动规划和轨迹控制时，总是在参考坐标系中来指定手部的位姿和姿态，即已知式 (3-12) 中各元素。为使手部能到达指定位置并具有指定姿态，必须驱动机械手各关节由当前位置到与手部位姿相对应的位置。也就是根据已知的末端执行器的位姿，求出相应的关节变量  $\theta_i$  ( $i=1, 2, 3$ ) 的过程。为此我们讨论机械手运动学逆问题。

这里我们设计的坯料装砌机械手有三个自由度，因此，从手坐标系到参考坐标系 {0} 的变换矩阵  $T_3$  为：

$$T_3 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-17)$$

由  $T_3 = T_3^0$  得：

$$\begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{123} & 0 & -s_{123} & -l_3s_{123} + l_2c_{12} + l_1c_1 \\ s_{123} & 0 & c_{123} & l_3c_{123} + l_2s_{12} + l_1s_1 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-18)$$

(3-18) 式对应的 (1, 1), (2, 1), (1, 4), (2, 4) 元素相等, 得

$$\begin{cases} n_x = c_{123} \\ n_y = s_{123} \end{cases} \quad (3-19)$$

$$\begin{cases} p_x = -l_3s_{123} + l_2c_{12} + l_1c_1 \\ p_y = l_3c_{123} + l_2s_{12} + l_1s_1 \end{cases} \quad (3-20)$$

将 (3-19) 代入到 (3-20) 得,

$$\begin{cases} p_x = -l_3n_x + l_2c_{12} + l_1c_1 \\ p_y = l_3n_y + l_2s_{12} + l_1s_1 \end{cases} \quad (3-21)$$

将式 (3-21) 进行变换得:

$$l_2^2 = (p_x + l_3n_x - l_1c_1)^2 + (p_y - l_3n_y - l_1s_1)^2$$

设  $p_x' = p_x + l_3n_x$ ,  $p_y' = p_y - l_3n_y$ , 则

$$l_2^2 = (p_x' - l_1c_1)^2 + (p_y' - l_1s_1)^2 \quad (3-22)$$

将式 (3-22) 再变换得:

$$2p_x' l_1 c_1 + 2p_y' l_1 s_1 = p_x'^2 + p_y'^2 + l_1^2 - l_2^2 \quad (3-23)$$

解得 
$$\theta_1 = \arcsin \frac{p_x'^2 + p_y'^2 + l_1^2 - l_2^2}{2l_1 \sqrt{(p_x')^2 + (p_y')^2}} - \arctan \frac{p_y'}{p_x'}$$

用  $A_1^{-1}$  左乘式 (3-17) 得:

$$A_1^{-1} T_3 = T_3^1 \quad (3-24)$$

即

$$\begin{bmatrix} f_{11}(n) & f_{11}(o) & f_{11}(a) & f_{11}(p)-l_1 \\ f_{12}(n) & f_{12}(o) & f_{12}(a) & f_{12}(p) \\ f_{13}(n) & f_{13}(o) & f_{13}(a) & f_{13}(p) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{23} & 0 & -s_{23} & -l_3s_{23}+l_2c_2 \\ s_{23} & 0 & c_{23} & l_3c_{23}+l_2s_2 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-25)$$

其中

$$f_{11}(i) = c_1i_x + s_1i_y$$

$$f_{12}(i) = -s_1i_x + c_1i_y$$

$$f_{13}(i) = i_z$$

$$i = n, o, a, p$$

(3-25) 式中对应的 (2, 3), (2, 4) 元素相等, 得到

$$\begin{cases} c_1a_y - s_1a_x = c_{23} \\ c_1p_y - s_1p_x = l_3c_{23} + l_2s_2 \end{cases} \quad (3-26)$$

两式联立可得

$$c_1p_y - s_1p_x = l_3(c_1a_y - s_1a_x) + l_2s_2$$

$$\text{所以 } s_2 = \frac{c_1p_y - s_1p_x - l_3(c_1a_y - s_1a_x)}{l_2} \quad (3-27)$$

(3-19) 式中对应的 (1, 4), (2, 1) 元素相等, 得到

$$\begin{cases} c_1p_x + s_1p_y - l_1 = l_2c_2 - l_3s_{23} \\ c_1n_y - s_1n_x = s_{23} \end{cases} \quad (3-28)$$

两式联立得

$$c_1p_x + s_1p_y - l_1 = l_2c_2 - l_3(c_1n_y - s_1n_x)$$

$$\text{所以 } c_2 = \frac{c_1p_x + s_1p_y - l_1 + l_3(c_1n_y - s_1n_x)}{l_2} \quad (3-29)$$

由式 (3-25) 和 (3-26) 可得

$$\theta_2 = \arctan \frac{c_1p_y - s_1p_x - l_3(c_1a_y - s_1a_x)}{c_1p_x + s_1p_y - l_1 + l_3(c_1n_y - s_1n_x)}$$

$$\text{或} \quad \theta_2 = 2\pi + \arctan \frac{c_1 p_y - s_1 p_x - l_3(c_1 a_y - s_1 a_x)}{c_1 p_x + s_1 p_y - l_1 + l_3(c_1 n_y - s_1 n_x)} \quad (3-30)$$

因为  $\theta_2$  在  $225^\circ - 315^\circ$  之间，所以取

$$\theta_2 = 2\pi + \arctan \frac{c_1 p_y - s_1 p_x - l_3(c_1 a_y - s_1 a_x)}{c_1 p_x + s_1 p_y - l_1 + l_3(c_1 n_y - s_1 n_x)}$$

(3-19) 式中对应的 (2, 1), (2, 3) 元素相等，得到

$$\begin{cases} c_1 n_y - s_1 n_x = s_{23} \\ c_1 a_y - s_1 a_x = c_{23} \end{cases} \quad (3-31)$$

由式 (3-28) 可知

$$\theta_{23} = \arctan \frac{c_1 n_y - s_1 n_x}{c_1 a_y - s_1 a_x} \quad (3-32)$$

$\theta_3$  由下式给出

$$\theta_3 = \theta_{23} - \theta_2 \quad (3-33)$$

至此，三个关节变量全部解出。

### 3.5 本章小结

本章首先介绍用齐次坐标变换来描述坐标之间的相对位姿的方法，然后详细叙述了建立连杆坐标系的 D-H 方法，建立了坯料装砌机械手的连杆坐标系简图，构建了该机械手的运动学模型，之后对坯料装砌机械手进行了运动学逆问题研究。这些内容是研究机械手运动学和控制的重要内容，也是机械手运动轨迹规划的基础。

## 第 4 章 工作空间分析

工作空间是从几何方面讨论机械手的工作性能。工作空间的大小代表机械手的活动范围，它是衡量机械手工作能力的一个重要的运动学指标。在机械手的设计、控制及应用过程中，工作空间都是一个需要考虑的重要问题。例如根据工作空间的要求来确定机械手的结构尺寸，冗余度机械手回避障碍物的动作规划等，都要考虑机械手可达空间。此外，也可用工作空间来衡量一个设计中的机械手机构的合理性。

### 4.1 工作空间的基本概念<sup>[21][22][23][24]</sup>

工作空间定义为：机械手正常运行时，手部机械接口坐标系的原点能在空间活动的最大范围，或者该原点的可达点占有的空间体积，这个原点通常位于手部的中心。总工作空间  $W(P)$  是灵活工作空间  $W^P(P)$  和次工作空间  $W^S(P)$  之和，灵活工作空间是末端执行器能以任意位姿达到的点所构成的上作空间，公式表示为：

$$W(P) = W^P(P) + W^S(P) \quad (4-1)$$

一般来说，工作空间都是一块或多块空间体积，它们都具有一定的边界曲面（有时是边界线）。 $W(P)$  的边界面上的点所对应的机械手的位置和姿态成为奇异位形，与奇异位形相应的机械手的速度雅可比矩阵是奇异的，所以机械手的工作空间边界面又常称为雅可比曲面，即雅可比矩阵的行列式等于零所对应的曲面。在这样的曲面上，机械手的手部参考点不能实现沿任意方向的微小移动或转动。

众所周知，实际制造的机械手，都有一定的结构限制，使得各关节变量只能在某一范围内变化。例如转动关节  $\theta_i < 360^\circ$ ，这时实际机械手和理想机械手（ $\theta_i = 360^\circ$ ）的工作空间就大不相同。为了加以区别，我们称实际机械手的工作空间为 B 类工作空间，记作  $W(P)_B, W^P(P)_B, W^S(P)_B$  理想的则称为 A 类工作空间，下脚标也可不注，因此  $W(P)_A > W(P)_B$ ，且  $W(P)_B \in W(P)_A$ 。对于

灵活空间内点的灵活程度，也受机械手结构的影响，所以我们又可把灵活空间分作两类：I类是末端执行器以全方位到达的点所构成的灵活空间，II类是末端执行器只能以有限个方位到达的点所构成的灵活空间，分别表示为： $W^I(P), W^{II}(P)$ 。

## 4.2 工作空间的基本描述

按 D-H 法设置机械手机构坐标系，由运动学分析可知，机械手的手部（末端构件  $n$ ）相对参考坐标系的齐次坐标变换矩阵为

$$T_n = A_1 A_2 \wedge A_n = \begin{bmatrix} n & 0 & a & p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4-2)$$

其中， $p$  代表手部坐标系  $O_n x_n y_n z_n$  的原点  $O_n$  在参考坐标系中的坐标， $p = (x_0, y_0, z_0)^T$ 。

给定了机械手的机构参数后，机械手的工作空间就由广义坐标（关节变量） $q = (q_1, q_2, \dots, q_n)^T$  决定。由于实际结构和驱动装置的限制，广义坐标只能在一定的范围内取值，即

$$q_{\min} \leq q \leq q_{\max} \quad (4-3)$$

其中， $q_{\min}$  为  $q$  的下界， $q_{\max}$  为  $q$  的上界。

因此，如果把末端执行器  $n$  上的坐标系  $O_n x_n y_n z_n$  的原点  $O_n$  作为机械手手部参考点，由工作空间的定义， $O_n$  所能到达的点的集合即为机械手的工作空间，那么由式（4-2）得

$$p = p(q) \quad (4-4)$$

用集合的方法，机械手工作空间  $W(O_n)$  可表示为

$$W(O_n) = \{p | q_{\min} \leq q \leq q_{\max}\} \quad (4-5)$$

上式满足式（4-3）的约束条件。

若选择参考点为  $P$  点，设它在手部坐标系  $O_n x_n y_n z_n$  的坐标为  $p_n = (x_n, y_n, z_n)^T$ ，在参考坐标系中的坐标  $p_0 = (x_0, y_0, z_0)^T$ ，则由齐次坐标变换矩阵可得，6

$$\begin{bmatrix} p_0 \\ 1 \end{bmatrix} = T_n \begin{bmatrix} p_n \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4-6)$$

即

$$p_n = p_0(q) \quad (4-7)$$

类似于上面的讨论，可以把 P 点的集合定义为机械手的工作空间，即

$$W(P) = \{p_0 | q_{\min} \leq q \leq q_{\max}\} \quad (4-8)$$

### 4.3 工作空间的确定方法

确定机械手工作空间的方法，归纳起来有三种：图解法、解析法和数值法，它们各有优缺点。坯料装砌机械手的三个关节组成典型的平面三自由度机械手，本文就研究 3R 机械手的工作空间确定方法。

由于图解法直观性很强，数值法的通用性强，因此我采用图解法研究机械手的工作空间的大小和奇异位形。

用图解法求工作空间，得到的往往是工作空间的各类剖截面(或剖截线)。它直观性强，便于和计算机结合，以显示在可达点机械手的构形特征。将前两关节和后一关节分成两组，前两关节称位置结构，主要确定工作空间大小，后一关节称定向结构，主要确定手部位姿。

首先求出前两关节形成的腕点工作空间。机械手简图如图 4-1，前两杆长分别为  $l_1, l_2$ ，腕点为  $P_w$ ，腕点到手末端长为  $l_3$ ，分析机械手机械结构可知，腕点绕肘关节（第二关节）旋转形成圆，该圆绕肩关节（第一关节）旋转形成圆环面，因为腰部是固定的，所以该圆环面就是腕点工作空间。由于结构限制各杆的转角范围， $\theta_1 = 0^\circ \sim 90^\circ$ ， $\theta_2 = 225^\circ \sim 315^\circ$ ， $\theta_3 = 180^\circ \sim 270^\circ$ ，机械手只有有限灵活工作空间而没有灵活工作空间。由工作空间的形成可知，腕点工作空间截面就是这样形成的：当关节变量  $\theta_2$  从  $\theta_{2\min}$  变到  $\theta_{2\max}$  时，腕点  $P_w (= O_3)$  绕  $z_2$  轴形成一段圆弧；当关节变量  $\theta_1$  从  $\theta_{1\min}$  变到  $\theta_{1\max}$  时，这段圆弧绕  $z_1$  轴形成环面的一部分。由关节变量  $\theta_2$  的取值范围可知，连杆 2 和连杆 3 既不能拉直共线也不能重合共线，即  $O_1, O_2, P_w$  组成三角形，所以环面的内径为  $\theta_{2\max}$  对应  $O_1P_w$ ，外径为  $\theta_{2\min}$  对应的  $O_1P_w$ 。求得腕点工作空间轴截面是由

四段圆弧组成：

①弧  $C_{PW}1$  关节变量  $\theta_1$  处于极大值，关节变量  $\theta_2$  从  $\theta_{2min}$  变到  $\theta_{2max}$  所形成；

②弧  $C_{PW}3$  关节变量  $\theta_1$  处于极小值，关节变量  $\theta_2$  从  $\theta_{2min}$  变到  $\theta_{2max}$  所形成；

③弧  $C_{PW}2$  关节变量  $\theta_2$  处于极大值，关节变量  $\theta_1$  从  $\theta_{1min}$  变到  $\theta_{1max}$  所形成；

④弧  $C_{PW}4$  关节变量  $\theta_2$  处于极小值，关节变量  $\theta_1$  从  $\theta_{1min}$  变到  $\theta_{1max}$  所形成。

该四段圆弧的形成如图 4-1 所示。

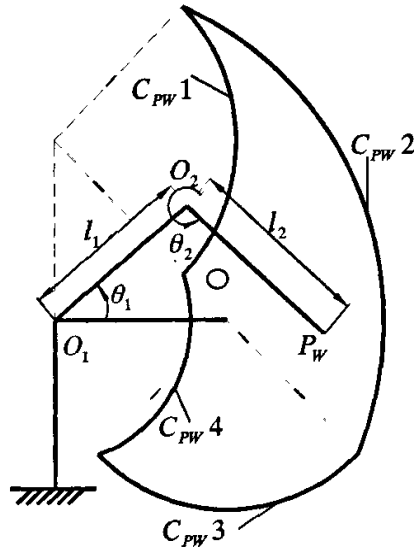


图 4-1 腕点工作空间轴截面

求出腕点工作空间轴截面后，以它的边界圆弧为腕关节原点  $O_3(=P_w)$  的轨迹，以腕点到手部中心长  $l_3$  为半径做一系列圆，该圆就是机械手手部在腕关节坐标系内的工作空间。该一系列圆的内、外包络线形成的截面即为机械手手部工作空间的轴截面，但该机械手腕关节转角  $\theta_3$  受结构限制，运动角度的范围如图 4-2 所示。四段外圆弧（粗实线表示）构成总工作空间边界，四段内圆弧（粗点划线表示）构成有限灵活工作空间边界，它们并非都是包络线。它们是这样形成的（图 4-2 中细双点划线表示图 4-1 中腕点工作空间边



界，虚线表示各构件在极限位置时的状态)：

①弧  $C_p0$  关节变量  $\theta_1, \theta_2$  处于极大值，关节变量  $\theta_3$  从  $\theta_{3min}$  变到  $\theta_{3max}$  所形成；

②弧  $C_p5$  关节变量  $\theta_1, \theta_2$  处于极小值，关节变量  $\theta_3$  从  $\theta_{3min}$  变到  $\theta_{3max}$  所形成；

③弧  $C_p1$  和  $C_p^p1$  弧  $C_p0$  沿腕点边界  $C_{pw}1$  运动所形成的边界；

④弧  $C_p2$  和  $C_p^p2$  弧  $C_p0$  沿腕点边界  $C_{pw}2$  运动所形成的边界；

⑤弧  $C_p3$  和  $C_p^p3$  弧  $C_p0$  沿腕点边界  $C_{pw}3$  运动所形成的边界；

⑥弧  $C_p4$  和  $C_p^p4$  弧  $C_p0$  沿腕点边界  $C_{pw}4$  运动所形成的边界。

从图 4-2 中可看出，有限灵活工作空间只是总工作空间中的一部分。

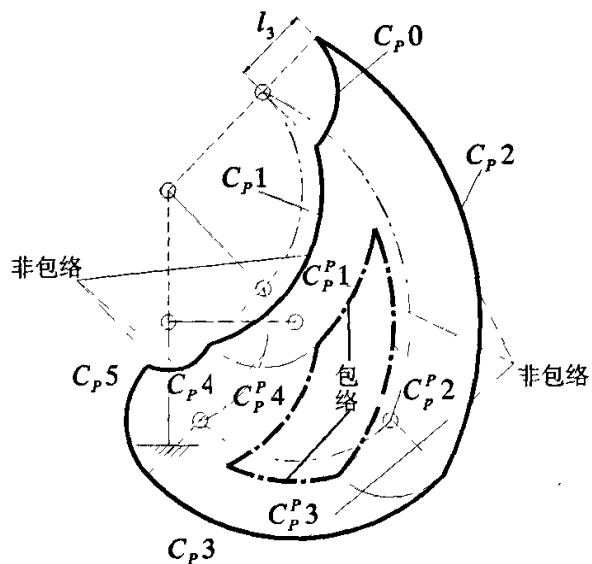


图 4-2 各类工作空间轴截面

表 4-1 工作空间轴截面

腕点工作空间轴截面

| 弧代号       | 圆弧方程                                | 圆心      | 半径     |
|-----------|-------------------------------------|---------|--------|
| $C_{PW1}$ | $x^2 + (z - 1650)^2 = 900^2$        | 0,1650  | 900    |
| $C_{PW2}$ | $x^2 + (z - 800)^2 = 1616.9^2$      | 0,800   | 1616.9 |
| $C_{PW3}$ | $(x - 850)^2 + (z - 800)^2 = 900^2$ | 850,800 | 900    |
| $C_{PW4}$ | $x^2 + (z - 800)^2 = 671.4^2$       | 0,800   | 671.4  |

总工作空间轴截面

| 弧代号    | 圆心           | 半径     |
|--------|--------------|--------|
| $C_p0$ | 636.3,2286.3 | 100    |
| $C_p1$ | 0,1650       | 905.5  |
| $C_p2$ | 0,800        | 1710.1 |
| $C_p3$ | 850,800      | 1000   |
| $C_p4$ | 0,800        | 583.54 |
| $C_p5$ | 213.6,163.6  | 100    |

有限灵活工作空间轴截面

| 弧代号      | 圆心      | 半径     |
|----------|---------|--------|
| $C_p^p1$ | 0,1650  | 1000   |
| $C_p^p2$ | 0,800   | 1621.4 |
| $C_p^p3$ | 850,800 | 905.5  |
| $C_p^p4$ | 0,800   | 721.6  |

总工作空间边界曲面就是奇异曲面，由关节变量 $\theta_3$ 的取值范围可知，当 $\theta_3 = 270^\circ$ ，即手部处于图 4.2 中边界弧 $C_p2$ 和弧 $C_p3$ 时，连杆 2 和连杆 3 拉直共线，机构处于特殊位形，机械手失去一个自由度；当手部处于图 4.2 中边界弧 $C_p0$ 、弧 $C_p1$ 、弧 $C_p4$ 、弧 $C_p5$ 时，有的关节运动到极限位置，机械手自由度减少，因此在机械手控制中应尽可能避免这些特殊位形。

工作空间的大小与各杆长有关，首先分析杆长变化对腕点工作空间的影响，在坯料装砌机械手中，肩高是固定不变的。当只有 $l_1$ 变化，比如在原来杆长上加个正数 $a$ 时，工作空间如图 4.3 中粗点画线所示，相对于原有空间(粗实线)有向右平移的趋势；当只有 $l_2$ 变化，比如在原来杆长上加个正数 $a$ 时，

工作空间如图 4-3 中细实线所示，相对于原有空间(粗实线)有向右下平移的趋势。由总工作空间和灵活工作空间的形成可知，杆长 $l_1, l_2$ 变化对它们的影响和对腕点工作空间的影响相同。当 $l_3$ 变化，比如它增大，也就是手越长，总工作空间越大，但相应的灵活工作空间越小，这意味着灵活性“降低”。

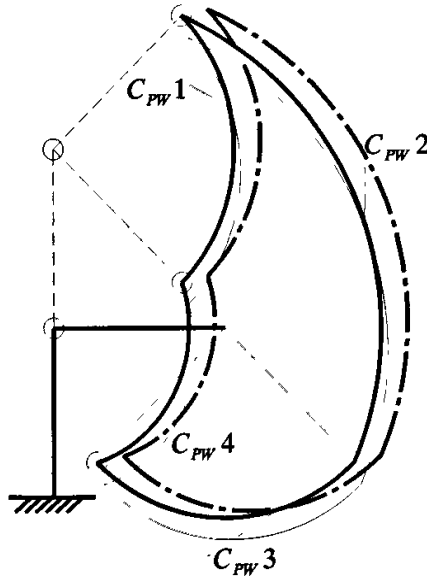


图 4-3 杆长对工作空间的影响

#### 4.4 工作空间中的空洞和空腔

在构成工作空间的过程中可能会出现空洞和空腔。空洞和空腔将影响机械手控制中的任务规划，因此，研究空洞和空腔是很有必要的。

如图 4-4 所示，空洞是在转轴 $z_i$ 周围，沿 $z_i$ 的全长参考点均不能达到的空间；空腔是参考点不能达到的被完全封闭在工作空间之内的空间。由图 4-2 可知，该机械既不会产生空洞，也不会产生空腔。

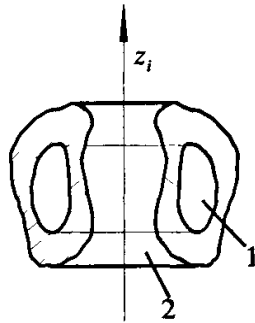


图 4-4 workspace 中的空洞和空腔

1-空腔      2-空洞

## 4.5 本章小结

本章介绍了机械手工作空间的定义、工作空间的数学描述，用图解法分析了坯料装砌机械手的工作空间的大小、奇异位形和杆长对工作空间的影响，最后分析了机械手工作空间中的空洞和空腔。

## 第5章 坯料装砌机械手轨迹规划

对于机械手系统来说，完成或实现某种作业实际上是使机械手跟踪期望轨迹的控制问题。机械手控制问题包含两个相关的子问题—运动（或轨迹）规划和运动控制。运动轨迹是机械手系统工作的依据，它决定了系统的工作方式和效率。机械手系统要完成某种操作作业，就必须对其运动轨迹进行规划，因此研究机械手系统运动轨迹的规划尤为重要。

本章在机械手运动学分析的基础上，讨论了关节空间和直角空间中机械手轨迹规划和轨迹生成的方法。轨迹规划是根据作业任务的要求，对机械手末端执行器的运动（包括位移、速度和加速度）做出预先的设计。机械手轨迹规划方法既可以在关节变量空间中进行，也可以在直角空间中进行。但是所规划的轨迹函数必须是连续的和平滑的，这样可使机械手末端执行器运动平稳。

### 5.1 问题描述

期望轨迹是用来描述机器人手臂所期望的运动，通常是各关节的位置及速度和加速度的时间函数。

**轨迹与路径** 路径只是指空间的曲线，不包含时间的概念，对于机器人来说。定义为机器人位形的一个特定序列，而不考虑机器人位形的时间因素。

轨迹规划是根据任务指令，规划机器人手臂末端的运动来完成预定任务，进而形成各关节的期望轨迹。

广义的轨迹规划包括下述功能：

- (1) 将作业要求转化为关节空间的一系列路径点；
- (2) 给定一系列路径点，在关节空间或笛卡儿空间用恰当的样条函数拟合形成轨迹（狭义的轨迹规划）；

**拟合条件：**通常要求拟合函数经过各路径点，并保持在各路径点的速度是连续的。此外，还应考虑关节驱动器的速度、加速度限制条件，并保持关节运动平滑，即位置、速度连续，有时还要求加速度连续。

(3)运行路径的形成：形成 $\theta$ ,  $\dot{\theta}$ ,  $\ddot{\theta}$ 以表示的轨线，并把它们传给各关节控制器。

对于 PTP 控制，通常只给出机械手末端的起始点和终了点，有时也给出中间的经过点，所有这些点统称路径点(或取道点)。应注意这里所说的“点”比几何上“点”的含义要广，它不仅包括机械手末端的位置，而且包括姿态(方位)，因此描述一个“点”通常需要 6 个量。

对于 CP 控制，机械手末端的运动轨迹是根据运动任务的需要确定的，需按照一定的采样间隔通过逆运动学计算将其变换到关节空间。有时，在关节空间也有一个寻找光滑函数来拟和这些离散点的问题。

## 5.2 关节空间的轨迹规划

关节空间里路径的形状用关节角的时间函数描述。

轨迹规划步骤：

(1)用逆运动学方法，把每个路径点转换成一组期望的关节角

(2)对于  $n$  关节机器人求得保证机器人经过所有路径点最终到达目的点的  $n$  个关节平滑函数。如果让每个关节在每段路径上运行时间相同，则所有关节会在同一时刻到达路径点，从而保证在路径点上机器人的位置和姿态满足预定要求

注意：这里只要求各关节的运行时间一致，每个关节所取的平滑函数与其它关节无关。通常每段路径所需时间是给定的。

关节空间轨迹规划常用到的有三次多项式函数插值，五次多项式函数插值，抛物线过渡的线性轨迹规划。

## 5.3 直角坐标空间里的轨迹规划

当机械手臂末端在直角坐标空间里的轨迹要求严格时，不能采用简单的关节空间里的轨迹规划。

机械手末端的位置和姿态通常用相对于基坐标系的齐次变换矩阵描述。以线性函数插值为例，可否对齐次变换矩阵的所有元素在相邻点之间进行线性插值？回答是否定的。因为齐次变换矩阵的各元素并不独立，它们需满足

一定的关系。因此，对描述机械手末端的姿态不能直接有对应的旋转矩阵来简单地进行插值，而描述位置的三个分量是相互独立的，它们可以直接进行插值。

直角坐标空间里的轨迹规划有以下特点：

(1) 通常将位姿的六维矢量分成位置和姿态两个三维矢量组来进行规划

(2) 为了让机械手手臂实现规划的轨迹，在直角坐标空间规划出的每个轨迹给定点（插值点）都必须进行坐标变换，按运动学逆问题转换成关节角度值。

(3) 直角坐标空间里的轨迹规划，还需要谨慎地绕开机械手手臂的机构奇异点。否则，运动学逆问题将无解。

实际上，所有用于关节空间轨迹规划的方法都可以直接用于直角坐标空间的轨迹规划。

直角坐标空间的轨迹规划的优点：

(1) 在直角坐标空间中所规划的轨迹比较直观，用户容易想象；

(2) 对于需要 CP 控制的作业，任务本身对在直角坐标空间中的轨迹有要求，因而必须首先规划在直角坐标空间中的轨迹。

直角坐标空间的轨迹规划的主要问题：

(1) 计算量远远大于关节空间法；

(2) 即使给定的路径点在机械手的工作范围，也不能保证轨迹的所有点均在工作范围，而关节空间法不存在这个问题；

(3) 在直角坐标空间中所规划的轨迹有可能接近或通过机械手的奇异点。

本文中采用关节坐标空间进行轨迹规划。

## 5.4 仿真轨迹规划

本文要求用 ADAMS 软件对机械手的作业过程进行仿真，那么就需要规划机械手末端执行器的运动轨迹，下面阐述用于仿真的轨迹规划过程。

### 5.4.1 建立工件坐标系

为了规划末端执行器（工具）的运动轨迹，需要建立一个工件坐标系，然

后在工件坐标系中规划运动轨迹。考虑实际基坐标系  $\{0'\}$  与所建立的机械手连杆坐标系中的基坐标系  $\{0\}$  之间的位姿关系，可以确定工具坐标系  $\{w\}$  在基坐标系  $\{0\}$  中的位置。

### 5.4.2 轨迹上的点在工件坐标系中的位置

通过轨迹方程可以求出轨迹上任意一点在工件坐标系中的位置。为了得到该轨迹点对应的关节数据（关节角），还需要知道这一点在基坐标系  $\{0\}$  中的位置，然后通过运动学反解计算得到各个关节的关节数据。这样就需要把该点在基坐标系中的位置向量与其在工件坐标系中的位置向量关联起来。根据坐标变换，得

$${}^0\bar{P} = {}^0T_w {}^w\bar{P} \quad (5.1)$$

${}^w\bar{P}$  表示该点在工件坐标系中的位置向量， ${}^0\bar{P}$  表示该点在基坐标系中的位置向量。

### 5.4.3 路径规划

因为本设计中坯料是一层一层进行堆放，所以在进行路径规划时需要分层进行分析。在这里我们取第一层，第二层，最后一层进行分析。

第一层：

按照实际运动要求，选取运动路径 A—B—C—D—E—D—B（路径如图 5-1）。

A—B：到达工作初始位置      B—C：到达坯料位置并抓取

C—B：抓取坯料上移          B—D：接近料框

D—E：放置坯料              E—D：机械手退出料框

D—B：返回工作初始位置



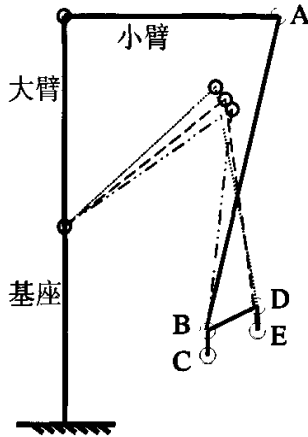


图 5-1 坯料装砌机械手运动路径(第一层)

这里取工具坐标原点 0 在关节 1 处，故工具坐标系 {w} 和基坐标系 {0} 重合。

A~E 这些点的坐标分别为：

A (900, 750); B (600, -520); C (600, -570); D (810, -420); E (806, -440)

第二层：

选取运动路径：B—C—B—F—G—F—B

B~G 点的坐标分别为：

B (600, -520); C (600, -570); F(820,-396); G (816,-416)

最后一层：

选取运动路径为：B—C—B—H—I—H—B—A

B~H 点的坐标分别为：

B (600, -520); C (600, -570); H (1040, 792); I (1036, 772); A (900,750)

第二层和最后一层的运动路径如图 5-2 所示。

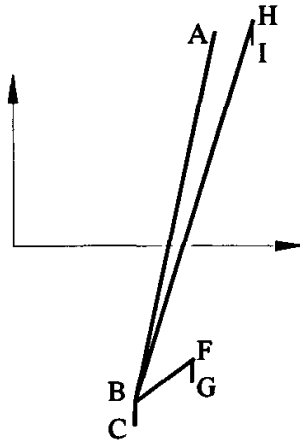


图 5-2 坯料装砌机械手运动路径（第二层，最后一层）

#### 5.4.4 关节角的计算

位置向量 ${}^0\bar{P}$ 和姿态矩阵 ${}^0R$ 确定之后，齐次变换矩阵 ${}^0T$ 中的各项均为已知量。这样就可以通过运动学反解计算得到对应于各个轨迹点的各关节的关节数据（关节角）。然后，在 ADAMS 中对这些关节数据进行插值，利用生成的与各关节对应的插值函数规划机械手的运动轨迹。

### 5.5 本章小结

机械手轨迹规划是机械手运动控制的关键。本章在机械手运动学计算的基础上，讨论了机械手轨迹规划的常用方法，尤其阐述了对机械手关节空间轨迹规划、直角空间的直线轨迹规划的算法原理和比较。

## 第 6 章 机械手模型建立

### 6.1 ADAMS 软件介绍

ADAMS 是 Automatic Dynamic Analysis of Mechanical System(机械系统动力学仿真)的简称, ADAMS 全仿真软件包是一个功能强大的建模和仿真环境, 它可以对任何机械系统进行建模、仿真、细化及优化设计, 涵盖范围从汽车、火车、航空航天器一直到盒式录象机各行业。该软件采用交互式图形环境和零件库, 约束库, 力库, 创建完全参数化的机械系统几何模型, 其求解器采用多刚体系统动力学理论中的拉格郎日方程方法, 建立系统动力学方程, 对虚拟机械系统进行静力学, 运动学和动力学分析, 输出位移, 速度, 加速度和反作用力曲线。

ADAMS 软件的仿真可用于预测机械系统的性能, 运动范围, 碰撞检测, 峰值载荷以及计算有限元的输入载荷等。ADAMS 一方面是虚拟样机分析的应用软件, 用户可以运用该软件非常方便地对虚拟机械系统进行静力学, 运动学和动力学分析。另一方面, 又是虚拟样机分析开发工具, 其开放性的程序结构和多种接口, 可以成为特殊行业用户进行特殊类型虚拟样机分析的二次开发工具平台。ADAMS 软件由基本模块, 扩展模块, 接口模块, 专业领域模块及工具箱 5 类模块组成, 用户不仅可以采用通用模块对一般的机械系统进行仿真, 而且可以采用专用模块针对特定工业应用领域的问题进行快速有效的建模与仿真分析。

### 6.2 建立机械手模型<sup>[38][39]</sup>

ADAMS 是一种多体系统仿真分析软件, 下面根据坯料装砌机械手的结构尺寸和运动学分析的结果, 在 ADAMS 软件平台上建立机械手的模型。

#### 6.2.1 设置操作环境

启动 ADAMS/View, 在出现的欢迎对话框中, 选择 Create a new model, 在 Model Name 中键入模型名字: jixieshou, 点击 OK, 进入 ADAMS/View 界

面。然后在主界面下设置操作环境：

(1) 设置单位 在菜单 Setting 中选择 Units, 出现单位设置对话框, 选择 MMKS, 在这种单位系统下, 长度的单位是: mm, 质量的单位是: kg, 力的单位是: N, 时间的单位是: s, 角度的单位是:  $^{\circ}$ , 频率的单位是: rad/s。

(2) 定义地面坐标系 选择默认状态下的笛卡尔坐标系作为地面坐标系。

(3) 定义重力 选择默认状态下大小为 1G 的重力加速度, 方向为默认的方向, 然后系统根据设置的重力加速度对构件自动施加重力。

(4) 设置工作栅格 在菜单 Setting 中选择 Working Grid, 出现栅格设置对话框, X, Y 方向的栅格范围分别设置为 750 和 1000, X, Y 方向的栅格尺寸分别设置为 50 和 50, 按 OK 确定。

(5) 设置图标尺寸, 在菜单 Settings 中选择 Icons, 出现图标设置对话框, 在 New Size 中输入 50, 按 OK 确定。

## 6.2.2 创建模型<sup>[40][41][42]</sup>

通过对机械手各个连杆的进行逐一建模, 就完成了机械手整体模型的构建。如图 6-1 所示。

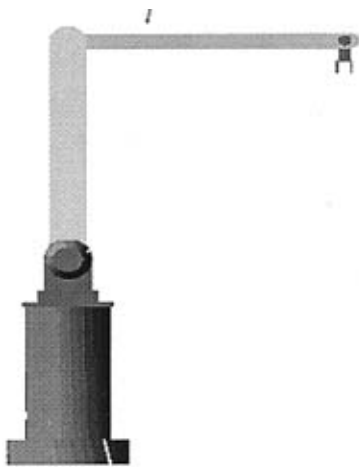


图 6-1-1 机械手模型的正视图



图 6-1-2 机械手模型的俯视图

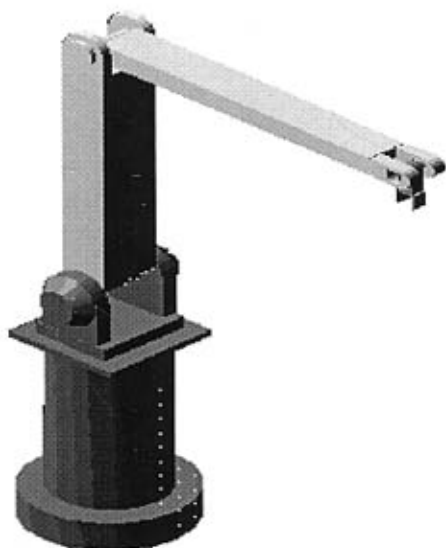


图 6-1-3 机械手模型的斜视图



图 6-1-4 机械手模型的右侧视图

图 6-1 机械手模型

### 6.3 向模型中添加约束<sup>[43]</sup>

机械手各杆模型建立后，需要在各个杆件之间添加运动副以约束杆件的自由度，由于该机械手具有三个转动自由度。所以在相邻的连杆之间添加铰链转动副（joint\_revolute）。


以连杆 1 和基座之间的铰链 JOINT\_jizuo\_liangan1 为例说明铰链约束的添加方法：首先在主工具箱中选择旋转铰链工具图标，然后依次选择连接构件 jizuo 和被连接构件连杆 liangan1，最后选择铰链添加的位置。并将铰链重命名为 JOINT\_jizuo\_liangan1。按照同样的方法添加其它的铰链，如表 6-1 所示。

表 6-1 机构中的转动副

| 铰链名称                    | 连接构件            | 被连接构件           |
|-------------------------|-----------------|-----------------|
| JOINT_jizuo_liangan1    | 基座(jizuo)       | 连杆 1 (liangan1) |
| JOINT_liangan1_liangan2 | 连杆 1(liangan1)  | 连杆 2 (liangan2) |
| JOINT_liangan2_gongju   | 连杆 2 (liangan2) | 工具 (gongju)     |

## 6.4 为机构添加驱动<sup>[44][45]</sup>

为使机械手能够按照规定的轨迹运动，需要在各个铰链上添加驱动 (motion)，然后在各个 motion 中写入已经规划好的各个关节的轨迹函数，使机械手在各轨迹函数的作用下，实现工具末端沿着规划的轨迹运动。

在添加驱动之前需要将各个关节的轨迹数据导入到 ADAMS 中生成样条函数。在 File 菜单下的 Import 命令对话框中选择文件类型为 Test Data, 然后选中 Creat Splines, 在 Independent column Index 中输入 1, 指定模型名后, 按 Apply 后就可以在 ADAMS 中生成样条函数。这样分别生成三个关节的样条函数, 依次命名为 joint\_1~joint\_3。

样条函数是连续函数, ADAMS/View 采用点与点之间的插值。样条函数可以用来产生运动和力, 并且在 ADAMS 输出的样条函数还可以作为有限元分析的载荷条件。



以关节 1 上的 MOTION1 为例, 首先在主工具箱中选择  (Rotational Joint Motion), 然后选择铰链 1 (JOINT\_jizuo\_liangan1) 作为施加的位置。这样就在铰链 1 上生成了一个 motion, 在这个 motion 的函数区中输入函数: -AKISPL(time,0,SPLINE\_1,0)。joint\_1 是前面所规划的关节角 1 的样条函数曲线, 角度的单位是度, 需要转化为弧度。最后点击 Apply, 按照同样的方法添加其它的驱动, 如表 6-2 所示。

表 6-2 各关节驱动的函数

| 驱动名称     | 函数                         |
|----------|----------------------------|
| MOTION_1 | -AKISPL(time,0,SPLINE_1,0) |
| MOTION_2 | -AKISPL(time,0,SPLINE_2,0) |
| MOTION_3 | -AKISPL(time,0,SPLINE_3,0) |

## 6.5 施加外力

本设计中堆放坯料重 7.5N, 在进行仿真之前需施加此力。施加单作用力的方法如下:


- 1) 选择单作用力工具图标 ;

2) 在设置栏选择 body moving, 将此力加到机械手末端的标记上, 力的方向为-y 方向, 大小为 7.5N。


## 6.6 本章小结

在建立十分复杂的机械系统样机模型时, 通常是在 Pro/e、UG 等建模功能更强大的软件中建好模型, 再利用 ADAMS 与这些软件之间便利的接口功能, 将建好的模型导入到 ADAMS 中, 然后进行模型的细化、仿真。在这里, 由于机械手的模型并不十分复杂, 故采用直接在 ADAMS 中建模的方式。建模时充分地参照和应用了前面运动学分析的结果。

## 第 7 章 机械手运动学仿真

建立机械手模型后,在 ADAMS 平台上进行仿真,测量机械手的运动学和动力学参数。ADAMS 在仿真分析过程中均采用插值方法求解方程。在插值求解过程中需要指定允许的误差,误差过大会导致仿真失败或得到错误的仿真结果,但仿真误差设置过小会增加仿真的计算机用时,导致仿真速度过慢。ADAMS 对各种分析设置了默认的插值允许误差,在这误差下仿真结果是比较理想的。这里采用默认的仿真插值允许误差,根据前面建立的样条函数曲线,把仿真时间设置为 104 秒,仿真步数设置为 100 步,按  开始仿真。在仿真过程中,机械手运行平稳。图 7-1-1 分别显示了从正视和侧视两个不同的视角观察机械手按轨迹执行作业的仿真过程,图中白色的曲线为工具末端的运动轨迹。

### 7.1 工具末端运动轨迹

仿真结束后,按  使仿真过程回到初始状态,选择 Review 菜单下的 Create Trace Spline,在选择工具末端的一个 Marker 点,最后选择地面(ground),这样就得到了工具末端在仿真过程中的运动轨迹,在这里仿真了第一层,第二层,最后一层,如图 7-1-1 所示。图 7-1-2 为仿真得到的轨迹。

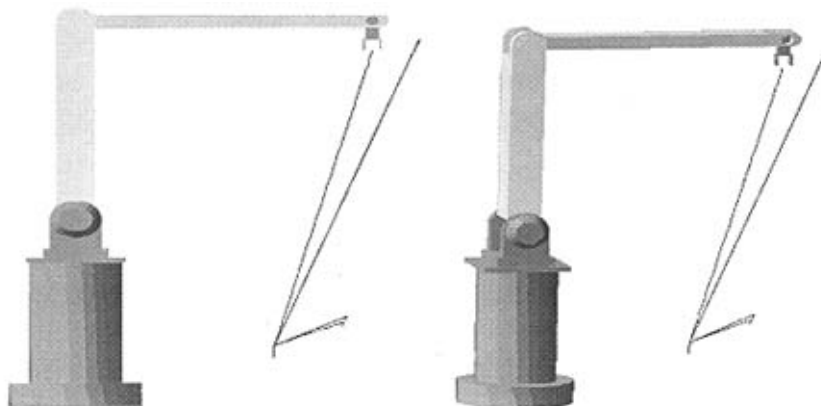


图 7-1-1 不同视觉角度观察的仿真过程



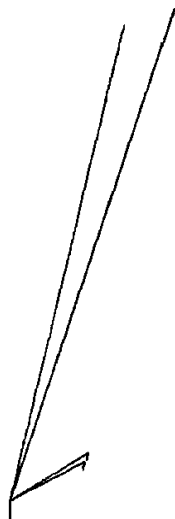


图 7-1-2 仿真得到的轨迹

图 7-1 仿真过程及轨迹

## 7.2 各个关节转角的仿真

关节角是机械手运动学中重要的参数，因此对仿真过程中各个关节的关节角位移变化情况的仿真是十分必要的。

以关节 1 为例，用鼠标右键点击铰链 `joint_jizuo_liangan1`，选择 `measure`，在出现的对话框中输入 `measure` 名，在 `characteristic` 中选择 `Ax/Ay/Az Projected Rotation` 项，在 `Component` 中选择 `Z` 方向。这样就建立了对关节 1 角位移的测量，按此方法建立其余关节角位移的测量。仿真过程中可以通过 `measure` 窗口动态观察关节角位移的变化情况。

在后处理（Postprocessor）程序窗口中依次生成各个关节的关节角位移曲线，如图 7-2 所示。

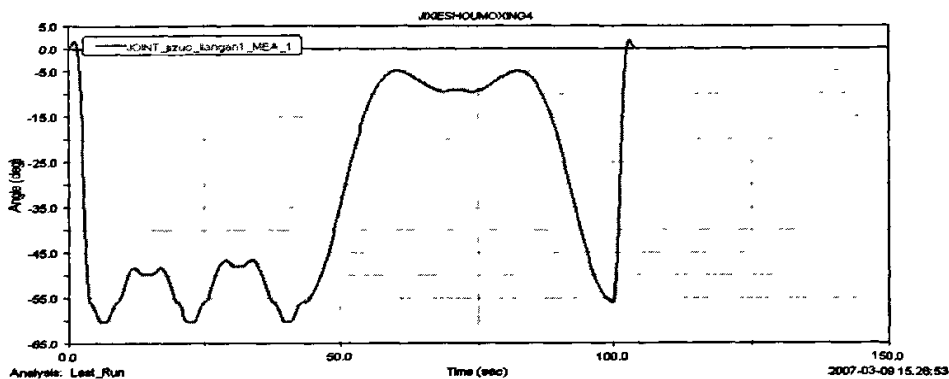


图 7-2-1 关节 1 角位移曲线

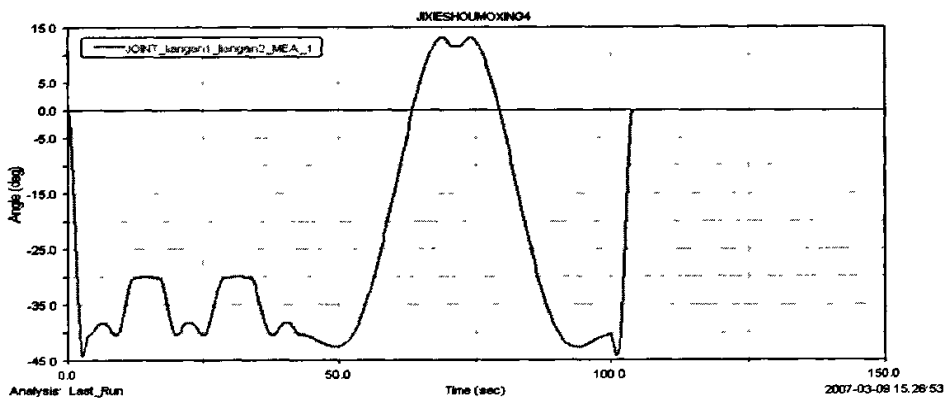


图 7-2-2 关节 2 角位移曲线

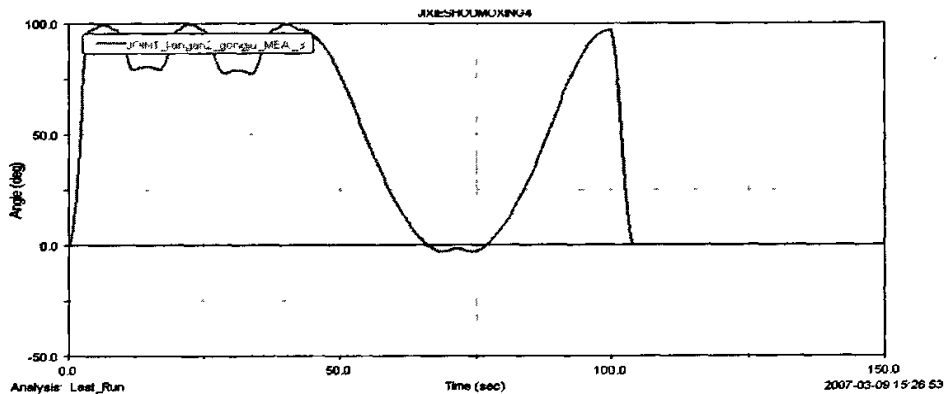


图 7-2-3 关节 3 角位移曲线

图 7-2 各个关节的角位移曲线

从关节角位移曲线图中可以看出，机械手在工作循环运动过程中，各关节的关节角度变化都比较平稳，无剧烈震动现象，这与前面所说的反解选取原则相符。

### 7.3 关节角速度的仿真<sup>[50]</sup>

同样以关节 1 为例，首先用鼠标右键点击铰链 joint\_jizuo\_liangan1，选择 measure，在出现的对话框中输入 measure 名，在 characteristic 中选择 Relative angular velocity 项，在 Component 中选择方向，然后点击 OK。所测量到的三个关节的角速度如图 7-3 所示。

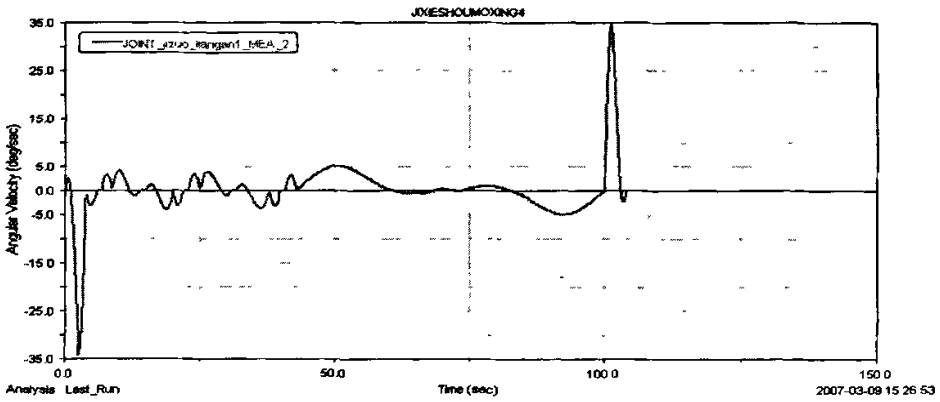


图 7-3-1 关节 1 角速度曲线

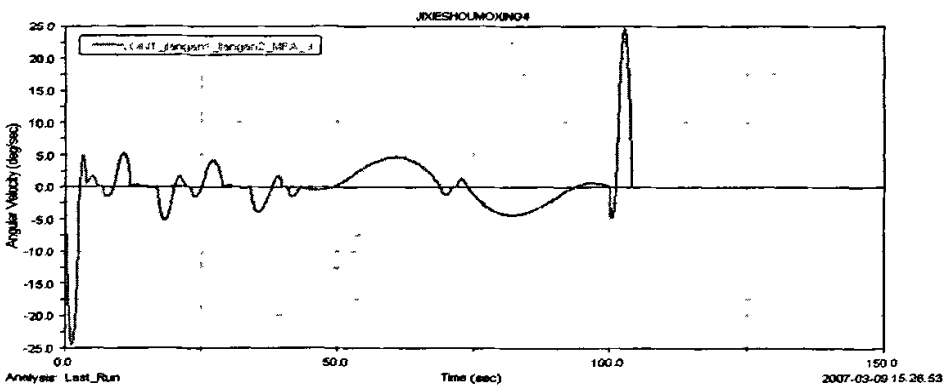


图 7-3-2 关节 2 角速度曲线

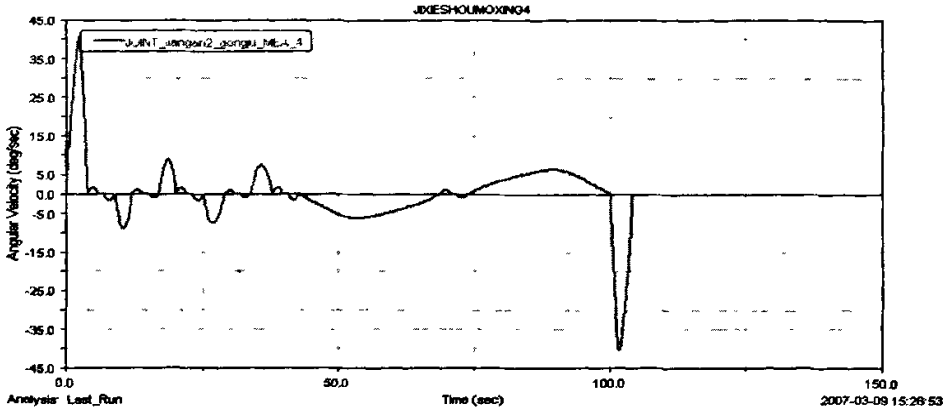


图 7-3-3 关节 3 角速度曲线

图 7-3 关节角速度曲线

由图形可看到机械手在工作循环过程内的关节运行比较平稳，并且角速度在运行周期内的曲线有许多相同及重复段，是因为在运行过程中由起点到终点和由终点到起点有相同段的路径，只是时刻不同而已。

## 7.4 工具速度的仿真

机械手末端工具的速度在每一个轨迹段都是指定的，下面查看仿真过程中工具的移动速度。

用鼠标右键点击工具末端的一个 Marker 点，选择 measure，在出现的对话框中输入 measure 名，在 characteristic 中选择 Translation velocity 项，在 Component 中选择 x、y、z 和 mag，这样就生成了对工具末端移动速度的测量。在后处理程序窗口中生成工具速度曲线，如图 7-4 所示。

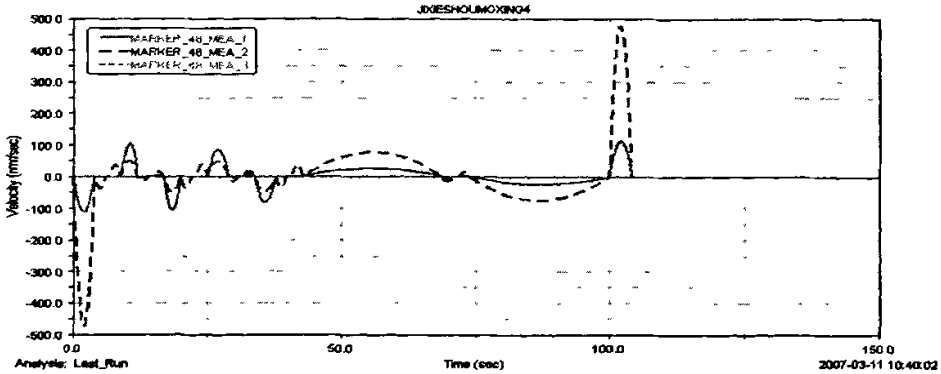


图 7-4-1 工具在 X、Y、Z 方向上的速度曲线

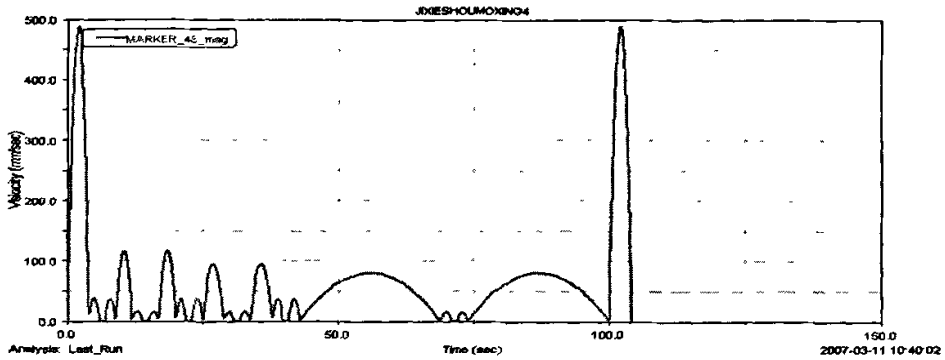


图 7-4-2 工具运动速度

图 7-4 工具速度曲线

由图像可以看出，在抓取、运送、放置坯料时，工具运动的速度跳跃比较小，这样有利于机械手的控制和定位。在从初始位置到工具运动的循环起点及放完坯料退回初始位置时速度的跳跃大，这是允许的，因为这个过程中不需要精确定位。

## 7.5 工具位置的仿真<sup>[51][52]</sup>

下面通过后处理程序查看工具末端点的位置变化情况。在后处理 (Postprocessor) 窗口中选择工具末端的 Marker 点，然后在 characteristic 中选择 Translational displacement，这样在一幅图中依次生成工具末端在 X、Y、Z 方向的位移曲线，如图 7-5 所示。

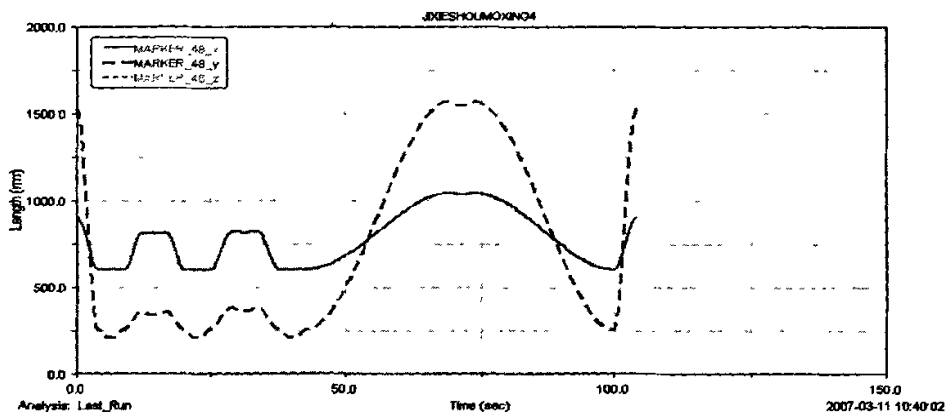


图 7-5 工具末端在 X、Y、Z 方向的位移曲线

由图形可以看出，工具末端在 Z 方向没有位移，因为工具只在 X,Y 平面内运动，这与实际相符。

## 7.6 各连杆质心角速度的仿真<sup>[53][54]</sup>

连杆质心角速度也是机械手运动学中个非常重要的参数，而且了解它对于研究机械手的动力学也有重要的意义。

以连杆 1 为例，在后处理(Postprocessor)程序窗口中选择连杆 1 的质心(cm)点，然后在 characteristic 中选择 Angular Velocity，这样在一幅图中依次生成连杆 1 的质心在 X、Y、Z 方向上的角速度曲线。按照同样的方法得到其它连杆的质心角速度曲线，如图 7-6 所示。

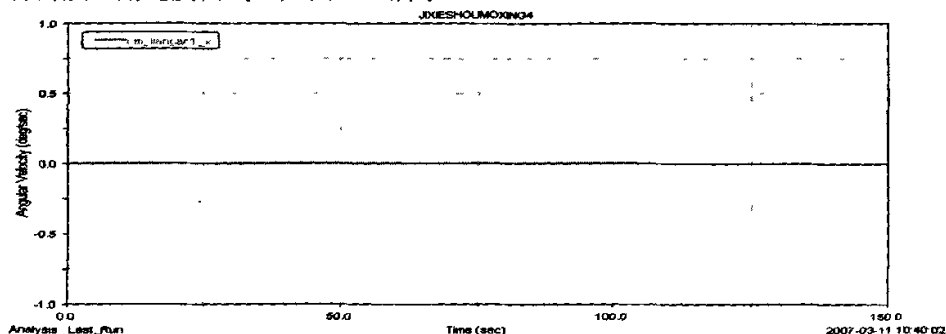


图 7-6-1-1 连杆 1 质心 x 方向角速度的测量

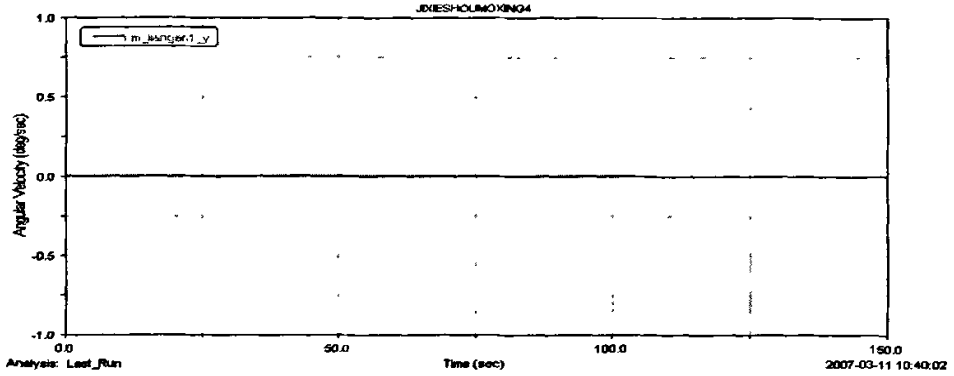


图 7-6-1-2 连杆 1 质心 y 方向角速度的测量

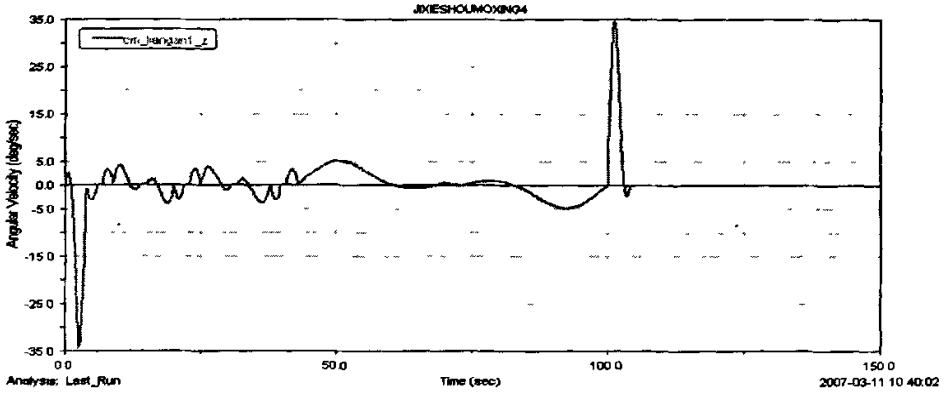


图 7-6-1-3 连杆 1 质心 z 方向角速度的测量

图 7-6-1 连杆 1 质心角速度的测量

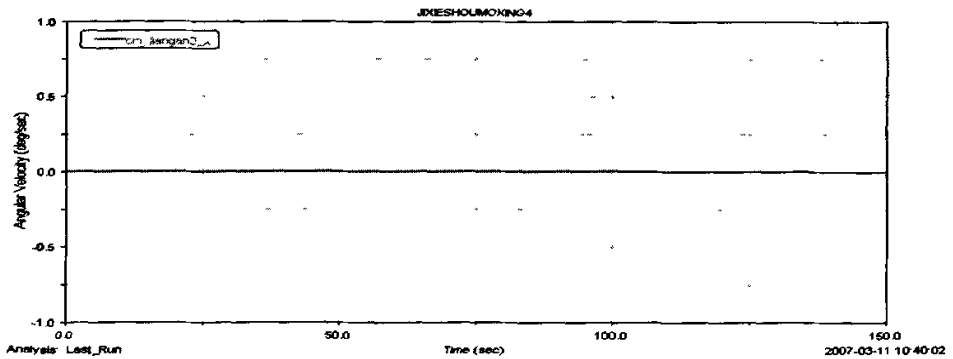


图 7-6-2-1 连杆 2 质心 x 方向角速度的测量

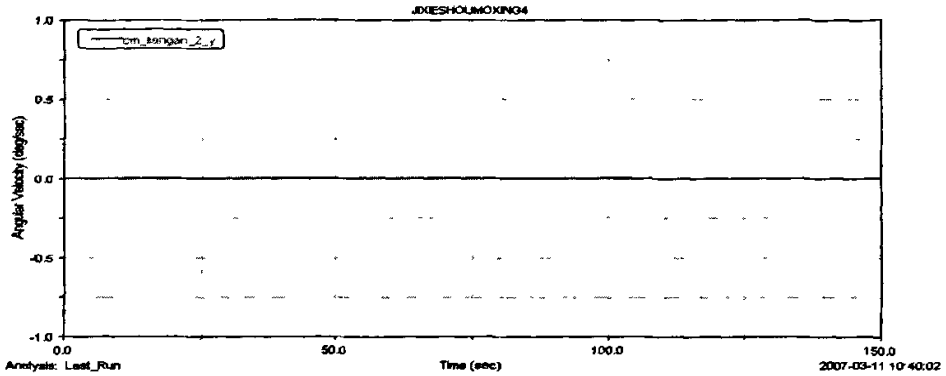


图 7-6-2-2 连杆 2 质心 y 方向角速度的测量

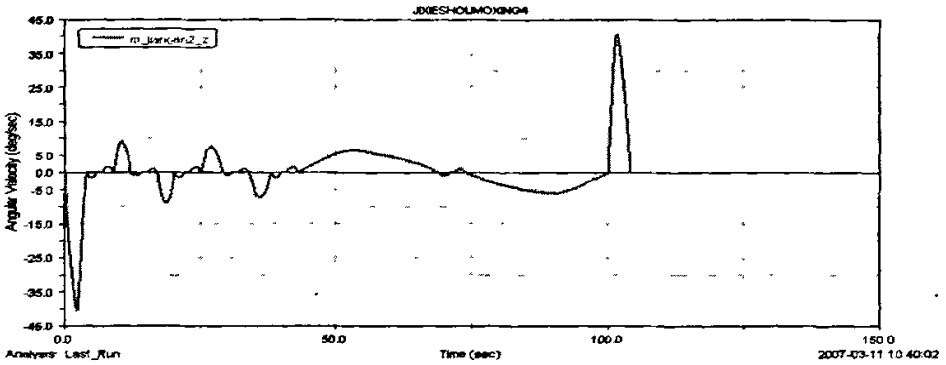


图 7-6-2-3 连杆 2 质心 z 方向角速度的测量

图 7-6-2 连杆 2 质心角速度的测量

由于连杆 1 和连杆 2 只具有一个转动自由度，它们分别绕着关节 1 的轴线和关节 2 的轴线旋转，所以连杆 1 和连杆 2 的质心角速度只体现为绕 z 轴旋转的角速度。并且在运动循环阶段质心角速度的跳跃较小。

## 7.7 末端执行器加速度的仿真

在末端执行器上的标记点 Marker\_48 建立末端执行器的加速度曲线图如下图 7-7 所示：



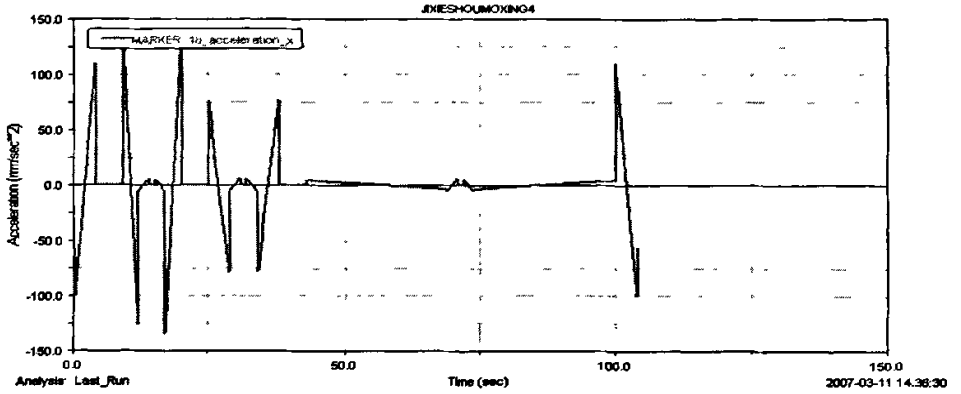


图 7-7-1 末端执行器在 x 方向的加速度

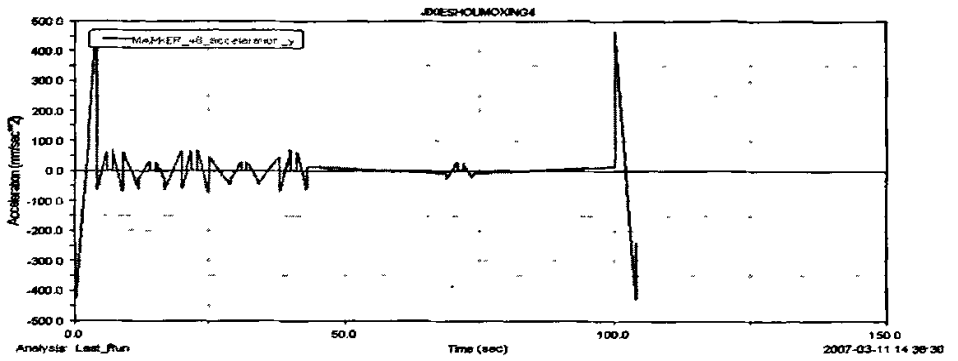


图 7-7-2 末端执行器在 y 方向的加速度

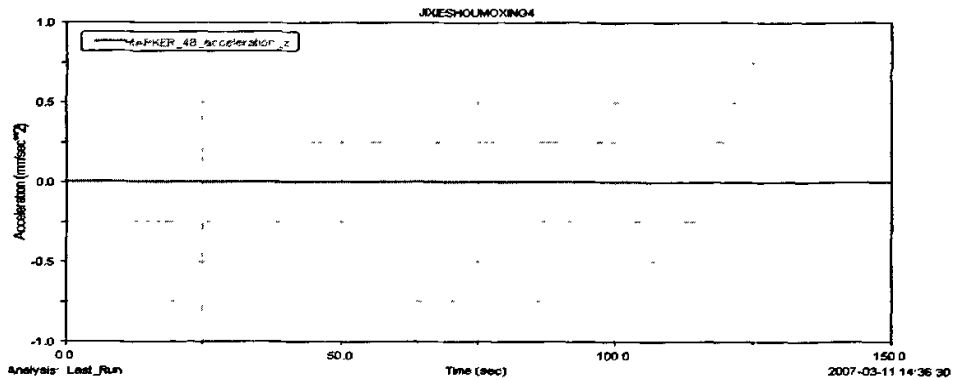


图 7-7-3 末端执行器在 z 方向的加速度

图 7-7 末端执行器的加速度

## 7.8 杆件动能的仿真<sup>[55]</sup>

下面研究连杆 1, 2, 工具的动能在运动过程中的变化情况。用鼠标右键点击构件, 选择 measure, 在出现的对话框的 Characteristic 里选择 Kinetic energy。测量得到的曲线如图 7-8 所示。

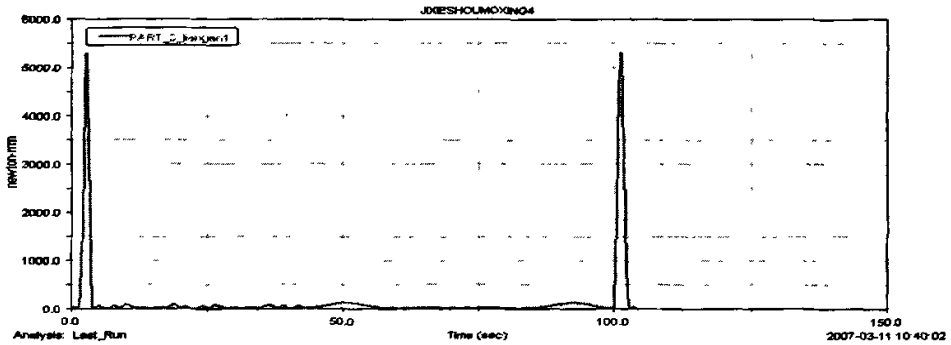


图 7-8-1 连杆 1 的动能

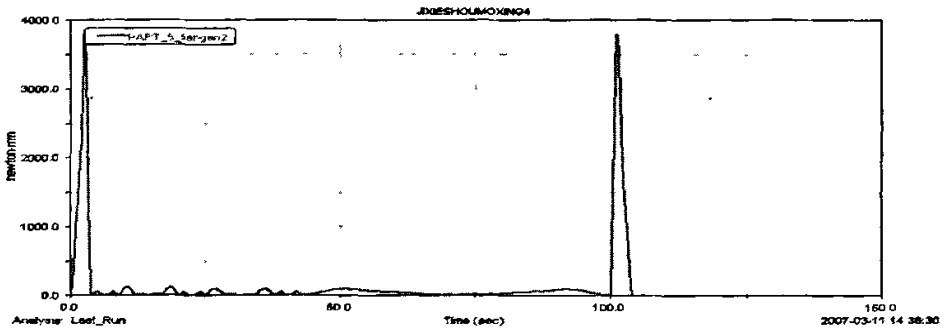


图 7-8-2 连杆 2 的动能

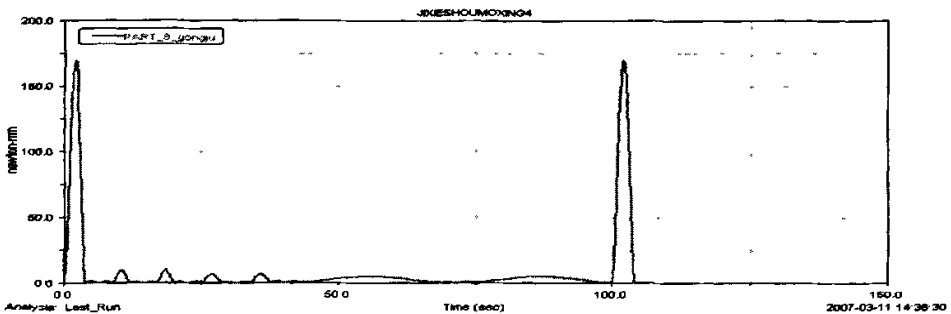


图 7-8-3 连杆工具的动能

图 7-8 连杆 1、2, 工具的动能

从上图可以看出，它们的动能曲线非常相似，这是由它们运动的相关性引起的。并且在整个运动循环过程中动能跳跃较小，这与速度是有关系的，说明速度的跳跃也小，有利于控制机械手的定位。但在从初始位置到循环点和最后回到初始位置阶段动能跳跃大，这段过程不属于循环阶段，速度可以大点，故动能也随之变化较大。

## 7.9 本章小结

本章在机械手模型建好之后利用 ADAMS 中的 Measure 工具或后处理程序测量沿轨迹运动过程中机械手的运动学参数以及动力学参数。这样，进行仿真后可以直观地观察仿真过程中机械手各个杆件的运动情况，而且可以检测末端工具是否在机械手的工作空间范围内。在 ADAMS 中的仿真结果可以为机械手的实际应用提供理论上的依据和支持。

## 全文总结

本文中的机械手是针对鄂南新型建材有限公司生产的钢丝网架珍珠岩夹芯板设备中的坯料装砌要求来进行的。根据现场的实际需要，设计了具有三个转动自由度的机器人，并对其进行了运动学分析，运用 ADAMS 软件对其进行了仿真，直观地再现了机械手抓取坯料的过程，从仿真过程中可以使我们对机械手的运动情况清晰可见。

该课题的研究为坯料装砌机械手的开发开拓了更加科学的方法，结合机械手的设计解决运动学及动力学问题，从而提高设计质量。

本文的主要成果可归纳为以下几点：

1. 根据实际的现场要求和机械手机构选型原则，确定了该机械手为具有三个转动关节的三自由度机械手。并且结合实际情况确定了机械手的空间尺寸和性能参数。

2. 采用 D-H 方法对该机械手进行了正运动学分析，运用齐次变换矩阵得出了机械手的运动学方程。接着对机械手进行了逆运动学分析，采用反变换法求解了运动学反解，得出了三个关节变量。

3. 结合机械手连杆的长度和关节角运动范围对机械手的工作空间进行了分析，从而确定了机械手的可达空间范围。

4. 规划了机械手关节空间的仿真轨迹；采用 ADAMS 软件建立了机械手的模型，并且进行了工作过程的仿真；对机械手进行了运动学和动力学分析。

由于本人专业水平有限和时间仓促，研究中难免存在一些不完善之处，在当前工作的基础上，今后可以在以下几个方面继续展开工作：

1. 进一步完善机械手系统的结构。

2. 充分考虑机械手中各部件的连接特点，在现有的运动约束的基础上考虑连接处的摩擦和其它一些干扰因素对系统的影响。

3. 由于抓取过程需要准确定位，所以机构运动的平稳性也有待进一步研究。

## 参考文献

- [1]熊有伦.机器人技术基础[M].武汉:华中科技大学出版社, 2002
- [2]孙富春, 朱纪虹.机器人学导论-分析、系统及应用[M].北京:电子工业出版社, 2004
- [3]吴振彪.工业机器人[M].武汉:华中理工大学出版社, 1997
- [4]王庭树.机器人运动学与动力学[M].西安电子科技大学出版社, 1990
- [5]张焕.六自由度机器人结构设计、运动学分析及仿真:[硕士学位论文].西安:西安理工大学, 2004
- [6]谷鸣宇.六自由度机械手运动学、动力学分析及仿真:[硕士学位论文].吉林:吉林大学, 2005
- [7]陈雪华.四自由度写字机器人的研究:[硕士学位论文].重庆:重庆大学, 2005
- [8]饶剑.基于 ADAMS 的悬架系统动力学仿真分析与优化设计:[硕士学位论文].武汉:武汉理工大学, 2005
- [9]邱宝梅.超声检测机械手的研制:[硕士学位论文].西安:西安科技大学, 2004
- [10]李军,邢俊文,覃文洁等.ADAMS 实例教程[M].北京:北京理工大学出版社, 2002
- [11]郑建荣.ADAMS 虚拟技术入门与提高[M].机械工业出版社, 2005
- [12]谭朝阳.机械手工作空间分析[J].机械, 2003, 30(3): 15~17
- [13]朱小平.轻型装卸机抓袋机械手的优化设计[J].北京工商大学学报(自然科学版),2001,19(3):38~41
- [14]王小北,林建龙,朱小平.抓取箱形物品的机械手的优化设计[J].机械设计与制造, 2002(6): 67~68
- [15]马纲,王之栋,韩松元.一种新型搬运码垛机械手的设计[J].机械设计与制造, 2000(4): 26~27
- [16]孙兵,赵斌,施永辉.物料搬运机械手的研制[J].机电一体化, 2005(2): 43~45
- [17]车仁炜,吕广明,陆念力.五自由度康复机械手的动力学分析[J].哈尔滨工业大学, 2005, 37(6): 746~747
- [18]潘沛霖, 杨宏, 高波, 吴伟光.四自由度折叠式机械手的结构设计与分析[J].哈尔滨工业大学学报, 1994, 26(4): 90~95
- [19]梁喜凤,苗香雯,崔绍荣,王永维.番茄收获机械手运动学优化与仿真试验\*[J].农业机械学报, 2005, 36(7): 97~100

- [20]付大鹏,黄胜全,赵立华.机械手运动学方程及优化设计[J].机械制造,2004(4):22~23.
- [21]金永南,王敏,黄心汉.一种新的机械手运动方程求解方法机器人[J].机械设计,1994,16(5):269~274
- [22]张为公,翟羽健,倪江生.汽车驾驶机器人换挡机械手的优化设计[J].中国机械工程,1995,6(1):36~38
- [23]尹自荣,熊晓红,骆际焕,王建坤.数控上下料机械手的研究及应用[J].锻压机械,1994(6):3~5
- [24]李光,胡协方,丁智平.一种实现机械手定位的方法[J].机械工程师,1995(3):35
- [25]常治斌.一种新型机械手手部夹紧机构的设计及应用[J].机械传动,1998,22(3):43~44
- [26]吴镇炜,谈大龙.机械手空间圆弧运动的一种有效轨迹规划方法[J].机器人,1999,21(1):8~11
- [27]蔡改贫,张晓莉.铝锭堆垛机械手的运动学分析及其仿真[J].江西有色金属,2003,17(2):45~47
- [28]金永南,王敏,黄心汉.一种新的机械手运动方程求解方法机器人,1994,16(5):269~274
- [29]张为公,翟羽健,倪江生.汽车驾驶机器人换挡机械手的优化设计[J].中国机械工程,1995,6(1):36~38
- [30]尹自荣,熊晓红,骆际焕,王建坤.数控上下料机械手的研究及应用[J].锻压机械,1994(6):3~5
- [31]李光,胡协方,丁智平.一种实现机械手定位的方法[J].机械工程师,1995(3):35
- [32]蔡改贫,张晓莉.铝锭堆垛机械手的运动学分析及其仿真[J].江西有色金属,2003,17(2):45~47
- [33]蔡自兴.机器人学[M].清华大学出版社,2000
- [34]张铁,谢存禧.机器人学[M].华南理工大学出版社,2001
- [35]李军,陶永忠.MSC.ADAMS FSP 基础培训教程[M].北京:清华大学出版社,2004
- [36]刘义翔,李瑞峰.应用 ADAMS 软件对点焊机器人手臂机构进行动力学仿真研究.美国 MDI(Mechanical Dynamics Inc)公司中国用户年会论文集,2001
- [37]尚喜生,郭卫东,满洁,张玉茹,张寿红.BH-4 灵巧手的虚拟样机设计.美国 MDI 公司中国用户年会论文集,2001
- [38]王人然.机器人[M].化学工业出版社,2002
- [39]杨公仆.工业机器人与机器人学[M].西安交通大学出版社,1989
- [40]陈哲,吉熙章.机器人技术基础[M].机械工业出版社,1997
- [41]刑俊文,陶永忠.MSC.ADAMS/VIEW 高级培训教程[M].北京:清华大学出版社,2004

- [42]王国强,张进平,马若丁.虚拟样机技术及其在 ADAMS 上的应用[M].西北工业大学出版社,2002
- [43]郭旭伟,王知行.基于 ADAMS 的并联机床运动学和动力学仿真[J].现代设计与制造,2003,32(7): 119-122
- [44]尤波,张永军,毕克新.PUMA560 型机器人逆运动学问题的解析解[J].哈尔滨科学技术大学学报,1994,18(4): 6-10
- [45]刘成良,张为公.RU12L6R 焊接机器人运动正解及计算机仿真系统[J].东南大学学报,1998(9): 84-88
- [46]段齐骏,黄德耕,李士楠.机器人工作空间与包络空间的图解法[J].南京理工大学学报,1996,20(4): 318-322
- [47]马香峰.机器人机构学[M].北京:机械工业出版社,1991
- [48] Optimal geometric design of robot manipulator link shapes, American Society of Mechanical Engineers, Design Engineering Division (Publication) DE,v82,n1,21st Annual Design Automation Conference,Advances in Design Automation,1995,p625-631
- [49]Fourier-based optimal design of a flexible manipulator path to reduce residual vibration of the endpoint, Robotica,v11,n pt3,May-Jun,1993,p263-272
- [50] OPTIMAL DESIGN OF MANIPULATOR ARMS BY USE OF MINIMAX TECHNIQUES, Japan Industrial Robot Assoc, v2, 1985, p895-902
- [51] DYNAMIC OPTIMIZATION IN MANIPULATOR DESIGN: THE OPERATIONAL SPACE FORMULATION, American Society of Mechanical Engineers, Production Engineering Division (Publication) PED, v15,1985, p169-174
- [52]Optimization of manipulator dynamics in non extreme design case. Robotica,v8 pt2,Apr-Jun,1990,p131-136
- [53]Lee G S G,ZieglerM.Geometric approach in solving inverse kinematics of PUMA robots,IEEE Trans AES,1984,20(6):p695-706
- [54]Elgazzar S.Efficient kinematic transfer motions for the PUMA560 robot.IEEEJournal of Robotics and Automation,1985,1(3):p142-151
- [55]Milonkovic V,Huang B.Kinematics of major robot linkages.In Proc of the 13 Int Symp on Industrial Robots,1983,p16-31

## 攻读硕士学位期间发表的学术论文

1. 郭柏林, 周艳平. 增压器的动态分析[J]. 中国水运, 2006, 8: 32~33.



## 致 谢

硕士论文完成之际，首先诚恳地感谢在学习和生活中帮助过我的老师和同学。

我的导师郭柏林副教授学识渊博，德高望重，是一位良师，又是一位益友。在近三年的学习和生活中，他给了我许多无私的帮助和无微不至的关怀，不仅让我在学业上受益匪浅，而且使我获得了许多人生教益。无论是做科研还是论文阶段，导师都对我进行了精心指导，并提出了很多宝贵意见和建议。真诚地感谢郭老师给予我学习和生活上的帮助。

三年的生活和学习中，特别是论文完成过程中，得到了同学项伟、胡正义等的帮助和关心，深深的同窗之谊将会成为我人生中最宝贵的一笔财富，在此谨向他们表示由衷的感谢。

最后感谢父母的哺育之恩，他们十年如一日，无私地支持我的学业和生活。我的今天与他们是永远分不开的。

回首三年难忘的时光，与导师促膝畅谈、与同窗和睦相处的情景历历在目，这份真正纯洁的友谊是我毕生的怀念。

最后，对评审论文的各位专家、学者表示衷心的感谢！

周艳平

2007年6月于武汉理工大学