

分类号 TP242.2

密级 公开

UDC 621

硕士学位论文  
六自由度焊接机器人本体设计  
制造以及性能分析

龚常亮

学科专业 机械制造及其自动化

指导教师 廖小平 教授

论文答辩日期 2011年5月27日 学位授予日期 2011年6月30日

答辩委员会主席 曾盛绰教授

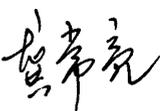
论文评阅人 林义忠教授 兰芳高工

# 广西大学学位论文原创性声明和使用授权说明

## 原创性声明



本人声明：所呈交的学位论文是在导师指导下完成的，研究工作所取得的成果和相关知识产权属广西大学所有。除已注明部分外，论文中不包含其他人已经发表过的研究成果，也不包含本人为获得其它学位而使用过的内容。对本文的研究工作提供过重要帮助的个人和集体，均已在论文中明确说明并致谢。

论文作者签名：

2011年 6月 8日

## 学位论文使用授权说明

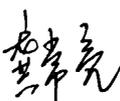
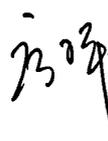
本人完全了解广西大学关于收集、保存、使用学位论文的规定，即：  
本人保证不以其它单位为第一署名单位发表或使用本论文的研究内容；  
按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版本；  
学校有权保留学位论文印刷本和电子版，并提供目录检索与阅览服务；  
学校可以采用影印、缩印、数字化或其它复制手段保存论文；  
在不以赢利为目的的前提下，学校可以公布论文的部分或全部内容。

请选择发布时间：

即时发布

解密后发布

(保密论文需注明，并在解密后遵守此规定)

论文作者签名： 导师签名： 2011年 6月 8日

# 六自由度焊接机器人本体设计

## 制造以及性能分析

### 摘要

焊接机器人是提高工作效率和焊接质量、改善工人劳动环境的重要工具，是国家“十二五”规划重要的创新发展内容之一。本论文提出采用焊接方法对焊接机器人的本体设计与制造，同时进行了运动学分析和仿真，以及焊接机器人整机的有限元静力分析和模态分析。文章主要包括以下几方面内容：

(1) 深入分析焊接机器人的工作特点和要求，在参考现有工业机器人的基础上，对焊接机器人的进行了整体方案设计，设计出焊接机器人本体模型，确定各部件的驱动传动系统。

(2) 通过对比单件样机试制的成本与时效分析，提出采用基于焊接方法来加工本体的关键部件，代替制造周期长、成本较高的铸造加工。在此基础上确定了关键部件的设计原则与焊接工艺原则，设计出了基于焊接方法的部件结构。

(3) 运用 D-H 法确定焊接机器人各连杆的参数，并建立运动学模型，运用数值分析法进行了运动学分析并解出运动学方程的正、逆解。

(4) 运用 Pro/E 和 ADAMS 的接口软件 MECHANISM/Pro2005 将在 Pro/E4.0 中建立的实体模型输入到 ADAMS R3 中，对机器人仿真模型进行运动学分析仿真。

(5) 应用有限元分析软件 ANSYS10.0 对焊接机器人进行静力学特性分析, 分析了焊接机器人整机应力分布和形变情况; 对焊接机器人模型进行模态分析得出了焊接机器人的动态特性。

**关键词:** 六自由度焊接机器人 设计制造 运动学分析 运动仿真

有限元分析

# THE STUDY ON DESIGN, MANUFACTURE AND ANALYSIS WITH SIX-DOF WELDING ROBOT

## ABSTRACT

Welding robot is an important tool to improve the efficiency and welding quality, improving the working environment of workers. In this study, the welding robot's body has been designed, the kinematics analysis and simulation, finite element analysis and modal analysis for welding has been completed. The mainly aspects of the paper as follow:

(1) After depth analysis of the welding robot work characteristics and requirements. The overall program of the robot has been design. The model of welding robot was designed and the drive and transmission system for each joint was determined.

(2) Welding method has been adopted by comparing the manufacturing cost and process time for robot body, which is replace cast method that need more time-consuming and costs. On this basis, the design principles and the principles of welding technology for the key components of welding has been determined. At last, the design of each component has been completed in three-dimensional design software Pro/E4.0 and the manufacturing methods have been determined.

(3) D-H method used to establish the welding robot kinematics model for the kinematics analysis. The positive problem and negative

problem of robot were solved.

(4) The solid model of the welding robot was established in Pro/E4.0. Then the model has been input to ADAMS R3 using MECHANISM /Pro2005, which is interface software of Pro/E and ADAMS. Then the kinematics simulation for model of the robot is completed.

(5) At last using finite element analysis software ANSYS10.0 to analyze static characteristics of the welding robot, grasp the stress distribution and deformation conditions. From modal analysis of welding robot model, the rules and characteristics of the dynamic response has been measured.

**KEY WORDS:** SIX-DOF Welding robot; design and manufacture;  
Kinematic analysis; Motion simulation; Finite element  
analysis

# 目录

第一章 绪论 .....	1
1.1 引言 .....	1
1.2 焊接机器人的发展历史和现状 .....	1
1.2.1 工业机器人在国内外的的发展状况 .....	1
1.2.2 我国焊接机器人应用状况 .....	2
1.3 焊接机器人研发的方向和先进技术 .....	2
1.3.1 计算机三维结构设计技术 .....	3
1.3.2 计算机系统仿真技术的发展 .....	4
1.3.3 基于 ANSYS 的有限元分析方法 .....	5
1.4 课题研究背景和目标以及本文的主要内容 .....	6
1.4.1 课题背景 .....	6
1.4.2 课题研究目标 .....	6
1.4.3 本文的主要内容 .....	6
1.5 本章小结 .....	7
第二章 焊接机器人本体设计 .....	8
2.1 引言 .....	8
2.2 焊接机器人本体总体布局 .....	8
2.2.1 焊接机器人操作臂的布局 .....	8
2.2.2 本体的结构确定 .....	10
2.3 焊接机器人的驱动和传动设计 .....	10
2.3.1 机器人前三关节的驱动传动 .....	11
2.3.2 机器人后三关节的驱动传动 .....	12
2.4 本章小结 .....	13
第三章 机器人关键零部件的制造 .....	14
3.1 引言 .....	14
3.2 本体关键部件制造可行性分析 .....	14
3.2.1 制造工艺分析 .....	14

3.2.2 制造成本分析 .....	15
3.3 本体关键部件的制造原则.....	15
3.3.1 结构设计原则 .....	15
3.3.2 焊接工艺原则 .....	16
3.4 本体关键零部件的制造.....	17
3.4.1 机座、腰部和肘部的制造 .....	17
3.4.2 大臂、小臂和腕部的制造 .....	20
3.4.3 各部件的总装 .....	23
3.5 本章小结.....	24
<b>第四章 焊接机器人运动学分析 .....</b>	<b>25</b>
4.1 引言 .....	25
4.2 位姿描述和齐次变换.....	25
4.2.1 平移坐标变换.....	25
4.2.2 旋转坐标变换.....	26
4.3 正运动学分析.....	28
4.3.1 机器人连杆坐标系的 D-H 建立方法与齐次变换矩阵 .....	28
4.3.2 运动学的正解 .....	30
4.3.3 运动学数学模型的验证 .....	32
4.4 逆运动学分析.....	33
4.5 本章小结.....	35
<b>第五章 基于 ADAMS 的焊接机器人运动仿真分析.....</b>	<b>36</b>
5.1 引言.....	36
5.2 虚拟样机技术介绍.....	36
5.2.1 ADAMS 软件基本模块.....	37
5.2.2 ADAMS 软件仿真特点.....	37
5.3 焊接机器人运动仿真.....	38
5.3.1 建立焊接机器人仿真模型 .....	38
5.3.2 机器人正运动仿真 .....	40
5.3.3 机器人逆运动仿真 .....	47

5.4 本章小结 .....	51
第六章 焊接机器人的有限元分析 .....	52
6.1 引言 .....	52
6.2 有限元技术 .....	53
6.2.1 有限元法 .....	53
6.2.2 ANSYS 有限元分析软件 .....	53
6.3 机器人整机的多工况静力分析 .....	54
6.3.1 静力分析建模 .....	54
6.3.2 静力学加载 .....	56
6.3.3 求解和后处理 .....	56
6.4 机器人整机有限元模态分析 .....	60
6.4.1 模态分析理论 .....	60
6.4.2 建模与加载 .....	62
6.4.3 模态计算结果输出 .....	62
6.5 本章小结 .....	64
第七章 总结和展望 .....	65
7.1 总结 .....	65
7.2 展望 .....	66
参考文献 .....	67
致谢 .....	71
攻读学位期间发表的学术论文 .....	72

# 第一章 绪论

## 1.1 引言

机器人技术是一门由计算机技术、信息技术、机构学、控制理论以及仿生学等多个学科综合而成的高新技术。机器人分为工业机器人和服务机器人两大类。目前应用最多的是工业机器人，应用于很多的领域：在制造业中，机器人可以用于毛坯制造、焊接、机械加工、表面处理、装配及堆垛等作业中，大大减少了工人的劳动强度，提高了操作安全性，同时降低了生产成本，提高了工作效率。焊接机器人是工业机器人家族的重要成员，它在高效、高质量的焊接生产中发挥了特别大的作用。目前各国都在加大对焊接机器人的研发。

## 1.2 焊接机器人的发展历史和现状

### 1.2.1 工业机器人在国内外的的发展状况

世界上第一台工业机器人 1959 年诞生于美国<sup>[1~3]</sup>。经过几十年来的发展，现在美国的机器人制造企业拥有雄厚基础，技术先进。在 20 世纪 70 年代早期，英国政府科学研究委员会颁布了 Lighthall 报告，这是一个限制人工智能和机器人研发的举措，导致后来英国的机器人技术一直落后与其他欧洲国家。其商品竞争力远远弱于其他国家。英国政府开始采取一系列方法，其中主要包括对机器人进行宣传、补贴购买机器人的企业、加强研究单位和企业的技术交流等。这些举措使英国的机器人产业逐步得到提高。德国的机器人工业起步时，政府采取行政手段支持机器人的发展；规定一些岗位必须使用机器人。有力的拓宽了机器人市场，加速了机器人的发展。日本在 60 年代从美国引进机器人及其技术并造出了第一台机器人。日本政府机器人企业采取的优惠政策使机器人产业出现跨越式发展。现在日本在许多领域都有机器人。

我国上世纪七十年代开始工业机器人技术的研究<sup>[4~8]</sup>，但由于各种原因导致发展速度很慢。1985 年，我国将工业机器人列为“七·五”科技攻关计划，由当时的机械工业部牵头，其他部门积极参与，形成了中国工业机器人第一次研发高潮。

经过三十多年的发展,我国在机器人领域取得了不错的成绩,产生了一批机器人企业,培养了一批机器人专家队伍。但是与国外的著名机器人企业相比还存在不小差距。

### 1.2.2 我国焊接机器人应用状况

焊接机器人是工业机器人应用重要组成部分。我国在上世纪七十年代末期开始进行焊接机器人的研究<sup>[9~11]</sup>。我国第一台焊接机器人于1985年在哈尔滨工业大学研制成功。1989年,华南理工大学和北京机床研究所共同研发了用于焊接自行车前三脚架的弧焊机器人,其后又研发出焊接汽车驾驶室的点焊机器人。上海交通大学研制了具有弧焊和点焊的功能的“上海1号”、“上海2号”示教型机器人。上世纪九十年代末期广东焊接研究所和其他单位联合设计开发出点焊机器人并装在焊生产线上。1996年底的一次焊接机器人调查显示,我国使用焊接机器人进行生产的工厂大约有70家,各类焊接机器人已达500台,其中绝大部分是5或6轴关节式机器人,主要应用工程机械、摩托车和汽车行业。1997年,我国首都钢铁公司和日本安川株式会社联合创办一个机器人制造公司,并在研制出第一批国产焊接机器人。1999年北京机械工业自动化研究所研制出采用了PC工控机控制和PMAC可编程多轴控制系统的AW-600型弧焊机器人工作站,于1999年4月通过了国家机械工业局的鉴定。1999年7月15日,哈尔滨工业大学、“一汽”集团和沈阳自动化研究所等三个单位联合研发出HT-100A型点焊机器人并通过了国家863计划智能机器人专家组验收。至此,我们国内的焊接机器人已开始走向实用化阶段。

可以预见,在21世纪焊接机器人各个层次的企业中。在新的历史时期,面对新的机遇和挑战,只有一方面要努力研究与开发具有自主知识产权的基础制造装备;另一方面,紧跟世界科技的发展潮流,通过引进和消化、吸收一些现有的先进技术,站在别人的肩膀上,尽快缩短和别人的差距。并通过应用研究和二次开发,实现技术创新和关键部件的产业化,提高我国焊接机器人技术产业在国际竞争舞台上的地位。

### 1.3 焊接机器人研发的方向和先进技术

从国际机器人技术发展态势来看,焊接机器人和其它工业机器人一样,在朝智能化和多样化发展。具体分为以下几个方面:1)操作机本体更加优化;2)机器人控制系统重点研究开放式,模块化控制系统;3)传感技术的发展,在焊接机器人中应用了激光、

视觉以及力传感器；4) 网络通信功能模块的研发，由过去的专用设备向标准化设备转变 [12~13]。

其中工业机器人操作机结构的研究包括以下方面：

- ① 高效先进的样机设计手段。在传统的设计方式下，机械零部件的图纸都由手工绘制，这样不仅设计周期长，还有可能因为设计者在漫长的设计中精神状态变得不佳而导致错误，而且手工绘制的图纸其修改又是个很难的事情。对于结构复杂的机械如机器人、数控机床等设计更是如此。先进的三维设计手段不仅提高效率，而且提高了设计的质量。
- ② 计算机仿真分析技术的应用。在对机器人的设计和试验过程中，运用计算机图形技术分析机器人的运动情况，对实际工作环境中的可能出现的问题进行模拟仿真，可以提前预知和解决机器人工作遇到的问题。通过有限元可以分析整机的受力情况和振动情况，实现对机械本体的优化设计。
- ③ 探索新材料的研发，在焊接机器人中采用轻质铝合金材料，这在很大程度上改善了机械本体的性能。
- ④ 机构向着模块化、可重构方向发展。机器人的结构更加灵巧，控制系统愈来愈小，二者正朝着一体化方向发展。RV 减速器及交流伺服电机的采用，使机器人操作机系统维护更加方便。

### 1.3.1 计算机三维结构设计技术

一种新产品开发都要经过设计、产品试制、性能测试，性能测试产品达标则可进行生产，若不达标设计方案需重新修改。然后在进行下一步，如此循环直至性能测试达标，过程简图如图 1-1 所示：

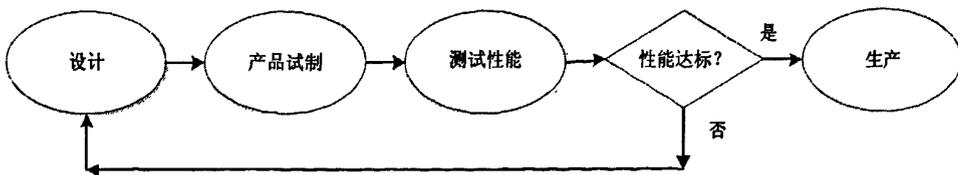


图 1-1 产品研发过程

fig.1-1 The process of product development

近年来,随着计算机技术的发展,计算机图形学、计算机辅助设计(CAD)被广泛应用到机械制造业中,它代表了一种新的设计模式。计算机三维结构设计技术综合了信息技术、虚拟现实技术,使人能够在产品生产之前就能认识到未来产品的性能和仿真状态,计算机三维结构设计技术的应用是产品开发过程中的产品试制和性能测试都得以在计算机中完成。大大缩短决策与优化实施方案的周期。现代机械产品的设计过程是相当复杂的,影响因素很多,以计算机技术和信息技术为基础的三维结构设计是提高新产品开发速度以及优化产品性能的有效手段,无疑它将成为 21 世纪的先进设计手段之一<sup>[14~15]</sup>。

### 1.3.2 计算机系统仿真技术的发展

计算机系统仿真是以计算机为工具,综合各种专业基础,利用计算机模型代替实际模型进行相关研究的综合技术。随着计算机技术的发展,物理实验逐渐发展成数字仿真,图形仿真以及虚拟现实成为重要的设计工具<sup>[16~18]</sup>。

#### 1) 计算机系统仿真技术的特点及优点

计算机仿真技术最大的特点是虚与实的结合<sup>[19~25]</sup>。它抓住系统基本特征,采用相似原理,把实际模型用计算机模型表达出来。研究对象可以是实际的系统,也可以是设想中的系统,将研究对象进行数学描述、建立模型、编程计算,在计算机中实现仿真。在计算机中建立的模型不怕破坏、易修改、可重用。从而简化了工作人员的研发工作。

在整个仿真过程中,只需计算机和相应的软件,无需其他物理设备。这可以节省大量的资源和费用。同时具有综合性强、应用面宽、学科面广、无破坏性、不受气候和地域的限制等独特优点。

#### 2) 机器人仿真分析的意义及研究现状

机器人仿真分析是计算机仿真技术在机器人研发中的应用。在机器人研究中,机器人运动仿真系统的灵活性和安全性越来越受到研究人员的青睐。目前国内外,在机器人运动学仿真的研究领域中,有以三维 CAD 软件建模,再导入运动仿真软件 ADAMS 对机器人进行三维实体机器人的正逆运动学以及动力学仿真。借助于功能强大的分析仿真软件 ADAMS R3,可以方便的实现机构性能分析和动态仿真,降低分析的难度,有效提高设计工作效率、产品开发质量,降低开发成本。随着机器人技术的高度综合和计算机集成制造(CIM)技术的发展,机器人仿真技术将显出其重要性和旺盛的生命力<sup>[26~29]</sup>。

机器人计算机仿真具有以下意义:

- ① 开发前期对设计论证和评优：对各设计模型进行运动学及动力学特性分析；
- ② 为机器人提供准确的动力学模型，作为控制的参考依据；
- ③ 对最终设计的产品进行性能校核，评估其运动状况；
- ④ 节省了用于试验的时间和其他投入；
- ⑤ 优化了样机结构，降低制造的成本；

### 1.3.3 基于 ANSYS 的有限元分析方法

有限元方法是进行科学研究的重要工具。它被用来求解各种复杂数学物理问题以及处理各种复杂工程问题。有限元方法的实施由三部分组成：计算原理、计算机软件、计算机硬件。

#### 1) 有限元法分析方法

有限元方法诞生于上世纪中叶，是计算力学和计算工程科学领域中最有效的计算方法<sup>[30-35]</sup>。有限元法的基本思想是将问题的求解域划分为一系列具有未知量的单元<sup>[36]</sup>。

在有限元法中，用一个简单函数表示位移。如：

$$y = \sum_{i=1}^n a_i \Psi_i \quad 1.1$$

式中  $a_i$  是系数， $\Psi_i$  是与坐标有关的函数。

根据平衡关系或能量关系建立节点量之间的方程式，建立方程组：

$$Kq = f \quad 1.2$$

式中  $K$  表示系统的刚度矩阵， $q$  表示系统节点的位移矩阵， $f$  表示系统所受的载荷矩阵。

经过多年的发展，有限元方法发展得日趋完善，出现了一批很实用的通用软件，成功解决了许多工程难题。取得了相当大的经济和社会效益。有限元软件已经成为推动科技进步和社会发展的重要的生产力。

目前国际上应用比较广泛的有限元分析软件主要有 ANSYS、ADINA、ASKA、NASTRAN 等。有限元分析软件有操作简单、使用方便、求解精度高等特点，已成为产品设计和性能分析的重要工具。

#### 2) ANSYS 的功能及特点

在众多有限元分析软件当中，ANSYS 是应用最广泛的，它是由美国 ANSYS 公司研制开发的。ANSYS 软件从 70 年代诞生到现在经过了 30 多年的发展，成为了功能全

备,可靠性高的有限元软件系统,它大多数 CAD 软件有接口,现代产品设计的重要高级工具。

在本课题利用 ANSYS10.0 对六自由度焊接机器人进行有限元分析。通过有限元静力分析、模态分析及仿真设计为机器人本体结构的优化设计提供参考依据。

## 1.4 课题研究背景和目标以及本文的主要内容

### 1.4.1 课题背景

焊接机器人在制造业技术改造、提高焊接质量、减少工人劳动强度、改善焊接劳动条件等方面显示了较强的优越性。经过广大科技工作者的辛勤努力,我国在焊接机器人技术领域的学术研究与应用推广工作从起步开始到现在已有长足的进步。在 2001 年举办的 863 计划 15 年成果展上,863 计划机器人主题有 58 项关键技术和应用基础技术研究成果达到国际先进水平。从另一方面来讲,目前我国的工业机器人市场份额大部分被国外工业机器人企业占据着。在国际强手面前,国内的工业机器人企业面临着相当大的竞争压力。如今我国正从一个“制造大国”向“制造强国”迈进,中国制造业面临着与国际接轨、参与国际分工的巨大挑战,这一切预示着我国的工业机器人应用及发展前景空间是非常巨大的

课题来源:本课题来源于国家自然科学基金资助项目“基于表面分割的制造工艺智能轨迹规划研究及其满意优化设计(50765001)”和广西区科技厅科技创新能力与条件建设项目“基于满意优化的 CAD 导航表面制造工艺轨迹规划平台研究与应用(桂科能 0815011-6-6)”。

### 1.4.2 课题研究目标

本课题组从国内焊接制造业的实际情况出发,研究开发性能指标和技术水平能够满足中小企业实际需求的可靠性高、操作灵活简便及易维修的焊接机器人机械本体,满足不同层次用户对焊接设备的实际需求,具有很好的实际应用意义

### 1.4.3 本文的主要内容

本论文的研究工作主要包括以下几个部分:

1、深入分析焊接机器人的工作特点和要求，进行了焊接机器人的方案设计，设计出了六自由度关节型焊接机器人的结构方案，并进行各部件的驱动和传动系统设计。

2、通过对比单件样机试制的成本与时效分析，确定机器人关键部件的制造方式。在此基础上确定关键部件的设计原则与加工工艺原则，设计出基于拟定的加工方法的部件结构。

3、运用 D-H 法对焊接机器人进行运动建模和运动学分析，解出运动学方程的正、逆解。进行验证。为对焊接机器人实施仿真分析提供参数和依据。

4、运用 Pro/E 和 ADAMS 的接口软件 MECHANISM/Pro2005 将实体模型输入到 ADAMS 中去，通过施加约束、驱动，在 ADAMS 中建立此机器人仿真模型进行运动学和动力学仿真和分析。为机器人在焊接过程中的参数的选择和物理样机的制作提供参考价值的参数。

5、利用在 Pro/E 中建立的焊接机器人三维模型，导入有限元分析软件 ANSYS10.0 中进行静力学和模态分析，研究整机应力应变情况和动态特性。

## 1.5 本章小结

本章总结了国内外的工业机器人的发展历程和中国焊接机器人的发展现状。分析了最新的科学技术下，机器人研发的方向以及目前先进的机器人本体制作技术。介绍了本课题的研究背景和课题研究的目标，在本章中，提出了本文的主要研究内容。

## 第二章 焊接机器人本体设计

### 2.1 引言

焊接机器人本体结构设计的首要问题是方案的设计,本章将根据该焊接机器人的工作对象、工作任务和性能要求,根据现有的加工条件,本课题设计的焊接机器人属于单件生产。本文对该焊接机器人进行本体结构布局、传动驱动系统以及零部件的设计。确定该焊接机器人的基本技术参数。

### 2.2 焊接机器人本体总体布局

#### 2.2.1 焊接机器人操作臂的布局

从结构的特点上分析,机器人可以分为并联型、串联型和混联型三种。并联型机器人的刚度较大、承载能力高,但运动空间较小;串联型机器人工作空间较大、运动灵活,但是刚度较小、承受能力低;混联型机器人兼顾了前面两种类型机器人的优点,但在灵活上面还是不如串联型机器人<sup>[37,38]</sup>。

根据运动形式,机械人臂常见的有直角坐标系、圆柱坐标系、球坐标系和关节式四种<sup>[39,40]</sup>。直角坐标机器人精度较高,但操作灵活性差,运动的速度较低,操作范围较小而占据的空间相对较大。圆柱坐标机器人工作范围大,运动速度高,但工作精度随水平臂伸长而降低。球坐标机器人在运动方面很灵活,但关节间的误差反映到末端的误差是个变量,这对于控制是个难题。关节式机器人运动灵活性最好、空间大、运动速度高。但实现高精度的运动较困难。

本论文研究的焊接机器人必须满足现代机械产品的焊接要求。末端需要能够在工作空间里做直线、圆弧、马鞍线等运动。焊接机器人手臂至少要有三个自由度才能够使焊枪达到工作空间中的任意位置。根据焊接的实际情况,机器人承载较小,但要求结构简单、容易控制、运动灵活、有较大的工作空间。所以在本论文的焊接机器人选择串联机构。机器人设计为六个关节,每个关节单独由伺服电机驱动。前面三个关节引导焊枪至所需位置,后边三个自关节用来决定末端焊枪的方向<sup>[41~43]</sup>。根据人的手臂结构中的运动

关节类型以及它们之间不同组合方式，手臂结构的布局有多种方案，常用的三种手臂结构布局方案如图 2-1 所示

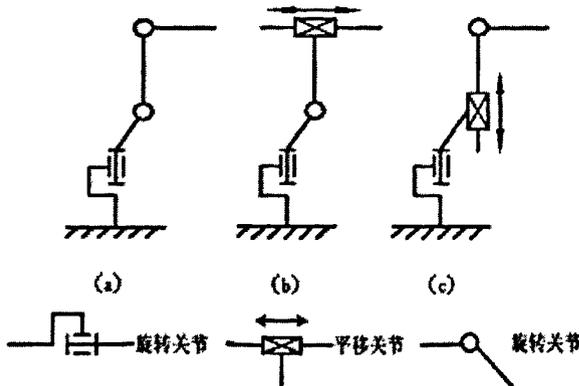


图 2-1 焊接机器人手臂结构布局

Fig.2-1 The arm configurations of the welding robot

本课题要求焊接机器人手臂能达到工作空间的任意位置和姿态，同时要结构简单，容易控制。在上图所示的三种机器人操作臂结构布局方案中，三种方案在运动传递方式上都能够把焊枪送达工作空间中的任意位置。但是比较而言，由旋转关节所组成的三自由度手臂结构紧凑所占空间小、手臂的操作空间大，运动灵活，适应性好。所以该焊接机器人操作臂前三个关节的结构布局选择图 2-1 (a) 中的布局方案。

焊接机器人手腕是机器人连接小臂与末端执行器的部件，处于机器人操作臂的最末端，根据手腕的活动可调整焊枪在空间的姿态，在一般情况下，3 自由度手腕可以能使末端完全地灵活。根据 B 关节和 R 关节排列的排序不同产生三种经典的结构：BBR 型手腕、RBR 型以及 RRR 型手腕。如图 2-2 所示。

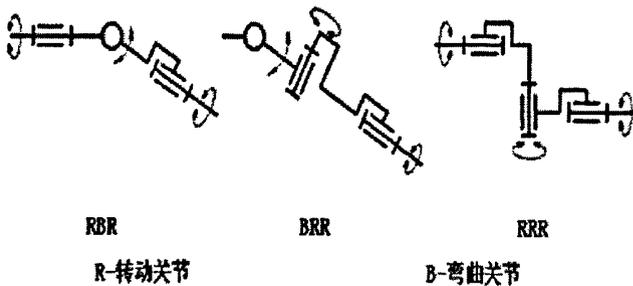


图 2-2 焊接机器人手腕结构布局

Fig.2-2 The configurations of the welding robot's wrist

在转动关节中，腕部的运动是绕着相邻运动构件的轴线进行的。在弯曲关节中，腕部转动平面和相邻运动构件的轴线垂直。RRR 结构工作空间大，但结构较复杂，对焊接的精度有较大影响。RBR 和 RRR 两种关节类型的适宜于远距离传动和控制，重量轻。

和 RBR 相比，RBR 结构更紧凑，同时 RBR 在完全展开时退化为两个自由度，适合微调操作。综合考虑，最后确定其结构形式为 RBR。

## 2.2.2 本体的结构确定

根据上述确定的焊接机器人操作臂结构布局方案，最终确定的本体结构如图 2-3 所示。

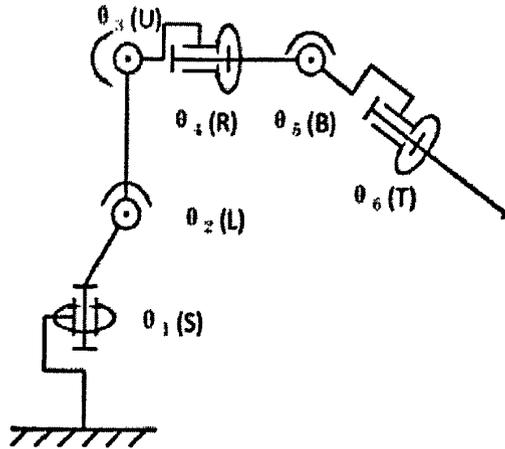


图 2-3 焊接机器人结构简图

Fig.2-3 Configuration sketch of the welding robot

由焊接机器人结构图可知，该焊接机器人的本体结构由基座、腰部、大臂、肘部、小臂、手腕以及末端工具组成，根据焊接工作的要求，设计机座高 135mm。大臂的长度为 260mm，小臂 220mm。腰部回转轴为 S ( $\theta_1$ )、大臂俯仰转轴 L ( $\theta_2$ )、肘部俯仰转轴 U ( $\theta_3$ )，小臂回转轴 R ( $\theta_4$ )、腕部俯仰轴 B ( $\theta_5$ ) 和末端工具回转轴 T ( $\theta_6$ )。前面三个关节决定了末端工具在工作空间的位置，后面三关节确定末端工具在工作空间的姿态。每个关节分配一个伺服电机驱动，单独驱动，此焊接机器人具有六个自由度。焊接机器人应具备的参数设置：①具有六个自由度。②臂展范围为 500-800mm。③重复定位精度要求：在  $\pm 0.5\text{mm}$ 。

## 2.3 焊接机器人的驱动和传动设计

驱动和传动装置的设计通常在焊接机器人结构设计的前面阶段完成，同时驱动装置和传动装置的设计又受到结构设计的影响。所以驱动和传动装置的确定需要建立在对工作情况的了解以及机器人结构明确的基础之上。得出机器人的大体模型，然后确定机器

人驱动和传动的方案，再设计和驱动，传动相关零件的设计，最后完成整个机器人机械结构的设计。前面一节已确定的焊接机器人总体结构和尺寸。在焊接实际中，焊接机器人的控制线和电线的布置有两种方案，一种是控制线和电线暴露在机器人本体外面，另一种方案是控制线和电线安装在机器人本体里面。前者利于维修和安装，但因此产生的问题也很多，首先，暴露的电线容易导致安全事故，同时各种线路和恶劣的工作环境直接接触，使用寿命大大缩短，反而增加了维护的工作量。控制线和电线安装在机器人本体里面，可以避免上述的一些弊端，但是它需要额外增加各种线路的通道，这样就增大了机器人本体的尺寸和重量。在本文中，控制线和电线安装在本体之内，这符合机器人设计的发展趋势。大臂和小臂都设置一个辅助臂，这样不仅能安装各种线路，同时也起到受力平衡的作用。最终得到的焊接机器人模型结构如下图所示：

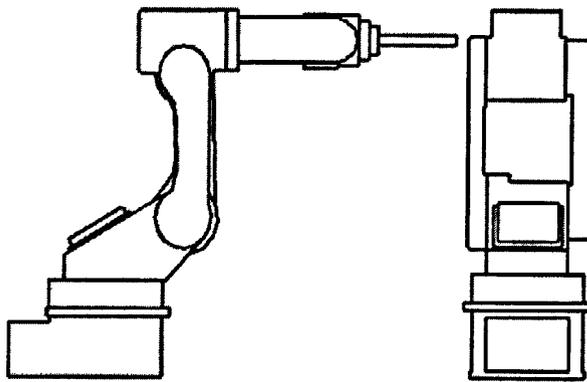


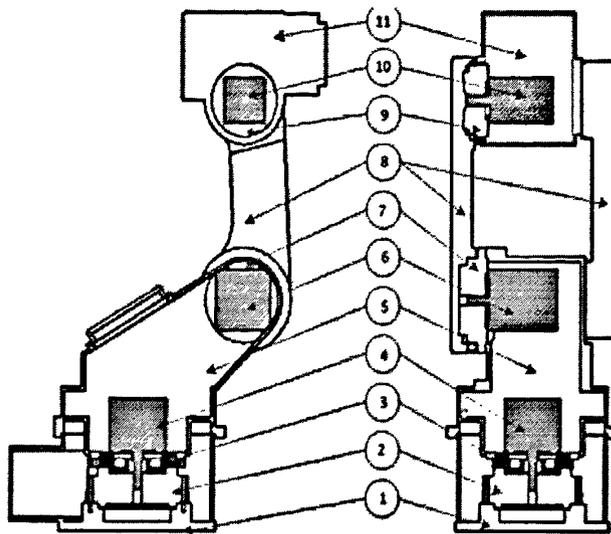
图 2-4 焊接机器人结构模型

Fig.2-4 structural model of the welding robot

### 2.3.1 机器人前三关节的驱动传动

焊接机器人的驱动传动系统包括两部分：驱动机构和传动机构。驱动机构通常有电机驱动，气动驱动和液压驱动装置，电机驱动有步进电机和伺服电机。目前应用较广泛的是交流伺服电机。在本课题中尝试了一些不同的方案。为了保证焊枪运动的精度，机器人结构要紧凑，末端部分的重量要轻。手腕结构尺寸在满足工作要求的情况下尽量小。同时机器人的驱动和传动部件尽量靠近前三个关节，选择质量轻的传动部件。齿轮传动存在诱导运动，不利于机器人的控制。这样每个关节最好采用单独的电机驱动，在减速和传动方面采用谐波减速器。综合考虑，最后确定的方案为，六个关节采用单独的电机

驱动，减速装置为谐波减速器，驱动腕部运动的电机安装在小臂靠近肘部的位置，通过带传动驱动腕部。前三关节的驱动传动设置如图 2-5 所示：



1-机座, 2,7,9-谐波减速器, 3-法兰, 4,6,10-电机, 5-腰部, 8-大臂, 11-肘部

图 2-5 焊接机器人前三关节驱动传动系统

Fig.2-5 The first three transmission systems of the welding robot

前面三个关节的传动方式如表 2-1 所示：

表 2-1 前三关节轴传动方式

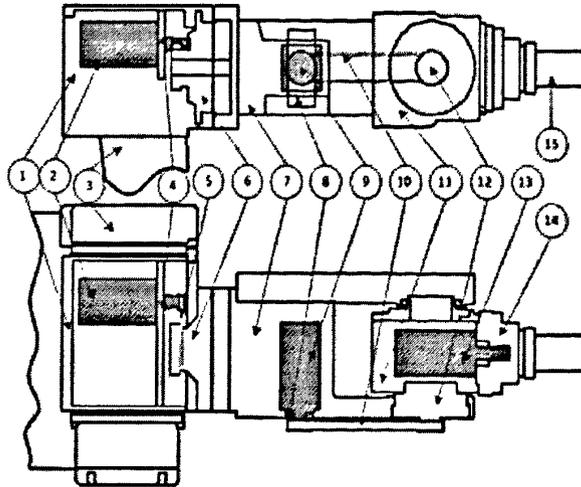
Tab.2-1 The transmission of first three joint axis of welding robot

关节轴	传输路线
S	电机 2→谐波减速器 2→法兰 3→腰部 5 回转
L	电机 6→谐波减速器 7→大臂 8 摆动
U	电机 10→谐波减速器 9→肘部 11 伸展

前三关节均采用伺服电机到减速器到关节执行构件的驱动方式。法兰 3 连接腰部 5 和谐波减速器 2 的输出端。电机 4 也固定在法兰 3 上。在大臂的驱动中，谐波减速器固定于腰部，输出端固定在大臂上。在大臂摆动的过程中，电机 6 是不运动的。谐波减速器 9 输出端固定于肘部。

### 2.3.2 机器人后三关节的驱动传动

后面三个关节也是采用伺服电机驱动方式。小臂的回转，腕部的俯仰和回转运动共同决定末端工具的姿态。图 2-6 为机器人后三关节的驱动和传动示意图：



1-肘部, 2,9,13-电机, 3, 大臂, 4,8-电机固定板, 5,10-传动带, 6,12,14-谐波减速器, 7-小臂, 11-腕部, 15-末端工具

图 2-6 焊接机器人手腕传动方案

Fig.2-6 The wrist transmission scheme of the welding robot

后三个关节轴的传动方式设计如表 2-2 所示:

表 2-2 后三关节轴传动方式

Tab.2-2 The transmission of last three joint axis of welding robot

关节轴	传 输 路 线
R	电机 2→皮带 5→谐波减速器 6→小臂 7 回转
B	电机 9→皮带 10→谐波减速器 12→手腕 11 俯仰
T	电机 13→谐波减速器 14→手腕 11 回转

电机 2 通过固定板 4 固定在焊接机器人肘部, 为减少肘部的尺寸, 电机 2 未直接和谐波减速器 6 连接, 而是通过传动皮带 5, 谐波减速器 6 输出端和小臂连接构成小臂的传动链。电机 9 由固定板 8 连结小臂上, 其驱动通过皮带 10 传递给谐波减速器 12, 谐波减速器 12 的输出端和腕部固定, 这样构成了腕部俯仰运动的传动链。这样的布局有利于减轻机器人末端的重量, 提高了运动的精度。电机 13 通过减速器 14 驱动末端工具 15 的回转运动。后三关节的转动轴交于一点, 有利于运动学的求解。

## 2.4 本章小结

本章首先分析了焊接机器人的工作特点和要求, 然后进行了焊接机器人的方案设计, 设计出了六自由度关节型焊接机器人的结构方案和本体模型, 在此基础上确定了个焊接机器人六个关节的驱动和传动系统。为各部件的结构设计和制造提供了相关结构尺寸。

## 第三章 机器人关键零部件的制造

### 3.1 引言

在前面一章中，确定了焊接机器人的总体尺寸、驱动和传动方式。本章讨论在单件生产条件下机器人本体关键零部件的制造方法。在焊接机器人本体的制作中，大臂、小臂和腕部可以直接通过机床加工得到，但有些关键零部件相对比较复杂，采用单一的机床加工难以完成，需要采用铸造或者焊接的加工方式。本章在确定关键零部件制造方法的时候充分考虑结构可靠性、加工的方便性。同时在满足强度、刚度的情况下，尽可能减轻大小臂等部件的重量，以提高机器人工作时的平稳性。

### 3.2 本体关键部件制造可行性分析

在国内外的主要机器人生产企业中，其机器人本体制造方式大部分是采用铸造的方式。本课题组在开发焊接机器人本体过程中，综合考虑了在单件加工条件下对本体制造方案的可行性。选择以小零件拼焊作为机器人本体关键部件的制造方式。这既是对现实的加工条件的考虑，也是本课题组在初期的研究中，对焊接机器人的制造方式以及基于焊接制造的机器人本体精度影响等方面做出的尝试。

#### 3.2.1 制造工艺分析

在传统的机器人本体制造中，采取的方法是先对机器人本体进行结构设计，然后做出木模，用浇铸的方式生产机器人本体，这对于大批量的生产是必要的。但是在单件的生产条件下，焊接和铸造相比，焊接制造不要求制作木模，工序相比要简单，同时焊接生产的周期要短。例如机器人的机座，如果采用铸造的方式，从木模的制作到浇铸完成需二十天的时间。而采用焊接的加工方式只需要两天时间就能完成。

与铸造相比，焊接加工还有另一个优点。焊接件不像铸件那样，需要设置很多的工艺结构比如肋板和圆角。这一方面可以简化设计和制造的程序，同时也节省了加工材料。

从质量上来比较，对于铸造加工，由于其模型制作和浇铸工艺的复杂性。往往出现工艺缺陷，零件质量难以得到保证。采用焊接的方式，把复杂的零部件分解成多个简单

的小零件，而这些小零件的加工都不难，质量容易得到保证。所以通过拼焊得到的零部件结构优于铸造结构。

所以，从本体的制造工艺上分析，采用焊接的加工方式更合适。

### 3.2.2 制造成本分析

前面一节中，从制造工艺上对本体采用铸造还是焊接加工进行了比较。这一节从制造的成本加以讨论。根据查阅相关的资料，并进入生产企业和企业负责人以及工人的交流得知：如果采用铸造的方式，我们需要对焊接机器人的机座、腰部和肘部各做一个木模，其制作的周期长，工艺复杂在前一节已经提到，根据收集的信息，制作一个机器人机座的木模需要 2000 元，还不包括材料费用和浇铸工人的工时费支出。具体的成本对比如下表所示：

表 3-1 机器人机座在两种加工成本的对比

Tab.3-1 cost comparison by two ways of producing for robot's base

加工方式	材料费/元	模具费/元	加工费/元
铸造（机座-铝合金）	200	2000	1000
焊接（机座-钢）	80	0	700

在铸造的过程中，由于毛坯的尺寸和形位精度难以保证，所以加工余量较大，用于机床加工的工时多，浪费的材料也很多。在单件生产中，焊接加工是更好的方式。

## 3.3 本体关键部件的制造原则

### 3.3.1 结构设计原则

在 3.2 节中，我们讨论了焊接机器人主要部件的加工方式，并确定了机器人机座、腰部和腕部采用焊接加工方式。要提高多零件拼焊件的精度，首先就是要考虑各零件的结构工艺性、焊接接头选择和装配定位精度。工艺性不好的零件结构设计一方面制造难度增加，而且也会使制造的成本大大提高；接头的选择要注意三个方面：①焊缝设置要便于焊接和检查，②焊缝要分散布置并避免交叉，③焊缝设置应避免最大应力处；零件装配定位精度则通过增加焊接夹具或设置定位工艺结构来保证。机座、腰部和腕部这三个部件的设计原则：

机器人机座是最主要的受力零部件之一。它下面通过地脚螺钉固定在工作台上，上面通过腰部谐波减速器和机器人腰部连接。根据工作的要求和焊接工艺的考虑，机座分

解为四个小部件：机座底板、机座尾箱、机座腰和机座谐波减速器座。这样的拆分使机座的加工不存在焊接死角。每个小部件的加工也很容易，加工精度容易保证。机座底板铣有小圆面和一个圆环槽，保证减速器座的定位精度以及它和机座腰的同轴度。这样就保证了机座的整体精度。

机器人腰部是本体中最复杂的部件，也是受力最大的部件之一。在焊接加工的条件下，由于其结构的复杂性，在设计时需要对其充分的细化和简化。摒弃复杂的工艺结构，多采用平面结构。设置加强筋以提高腰部的强度。对腰部中不受力的部位减少厚度，降低腰部的整体质量。腰部共拆分为 16 个小零件，其中腰部上和大臂相接的两个环要预留加工余量，以进行同轴度校核。

机器人肘部需要安装送丝机构，前端还承载着小臂、腕部和末端的重力。主体采用折弯的钢板。前端和小臂相连的部位是肘部的主要受力部位，其壁厚相比肘部其他部位要厚 2mm。肘部设了两个圆环，和大臂左右臂分别连接，所以也要预留加工余量以便同轴度校核。

机器人三个焊接结构件包括对接接头、T 形接头、角接接头和端接接头四种接头形式。

### 3.3.2 焊接工艺原则

电阻焊中的点焊是常见而成本较低的焊接方法，它是将焊件装成接头压在两个电极之间，利用电阻产生热量而熔化焊接材料而形成焊点的电阻焊方法。薄板焊接通常应用点焊。机器人的零部件都不是大型焊接件，所以在拼焊时不需要额外的焊接夹具，增加用于定位的工艺结构即可达到装配和定位精度要求。在本体焊接制造中，影响整体精度和强度的另外因素是焊接残余应力和变形。

焊接后出现残余应力，这是不可避免的现象。但是可以通过采取恰当的工艺措施予以调节和减少。焊接残余应力是焊件受到不均匀的加热和冷却，在焊缝收缩的过程中产生的内部应力。控制和降低残留应力的基本原则是缓减对焊缝收缩的制约<sup>[44]</sup>：1) 采取合理的焊接次序，受力较大的焊缝先焊接。2) 在焊接前对焊接件进行预热。3) 对于圆环等对称焊缝采取对称焊的方式，这就是同步收缩法，以减轻焊接残余应力。另外，对接接头在焊缝与焊接件的过渡处会有应力集中，需要严格的装配尺寸；减少 T 形接头应力集中的重要措施是把焊件焊透；角接接头需要两面焊，以降低残余应力，提高质量。

焊接变形是由焊接应力引起的。焊接变形不但影响机器人部件的整体的装配精度，同时也导致机器人在工作的过程中受力不均，降低机器人的使用寿命。控制焊件的变形要从控制焊接应力入手，这一点在讨论控制焊接残留应力时已讲到。对焊接变形修补，在残留应力消失后还没有恢复，那就需要矫正了。矫正有两个措施：1) 火焰矫正法：在焊缝及附近区域进行点状加热、线状加热和三角加热，同时施加外力，这样可以有效矫正焊接变形。2) 给一些有装配尺寸联系的零件预留加工量，在焊接后再进行机床加工，保证装配精度。比如机座上的减速器座，在高度方向预留加工余量，焊接后可以铣加工以符合和腰部的装配；腰部和大臂连接的两个环同样预留加工余量，焊接后进行扩孔加工保证其同轴度要求。

### 3.4 本体关键零部件的制造

在上面几节中对在单件生产条件下机器人关键部件的制造可行性进行了分析；确定了机座、腰部和肘部的加工方式以及基于焊接方法的结构设计思路；分析了制造的原则。本节运用三维软件 Pro/E4.0<sup>[45]</sup>对机器人机座、腰部、肘部、大臂、小臂以及腕部的结构进行设计，确定加工方式。

#### 3.4.1 机座、腰部和肘部的制造

焊接机器人的机座、腰部和肘部采用拼焊拆分的简单零件而成。因为机座是固定的，其重量对焊接机器人工作精度没有影响，同时机座是主要受力部件，其强度和刚度要得到保证。所以机座的零件壁厚相对腰部和肘部较厚。腰部和肘部轻量化可提高机器人的工作精度，在受力大的部位留有较大的壁厚。

##### 1) 机座

在焊接机器人中机座是一个关键部件。它固定在工作台上，又承载着机器人的所有重量，同时所有控制线和电路线都经过机座布置到机器人的其他部件。机座主要由四部分焊接而成：底板、谐波减速器底座、腰部和尾部。这是在焊机器人的单件生产中采取的加工方式。这样就把复杂的机座结构分解为简单的多个零件组成，这种加工方式还应用到了机器人的其他几个复杂部件中。机座各零件如图 2-7 所示：

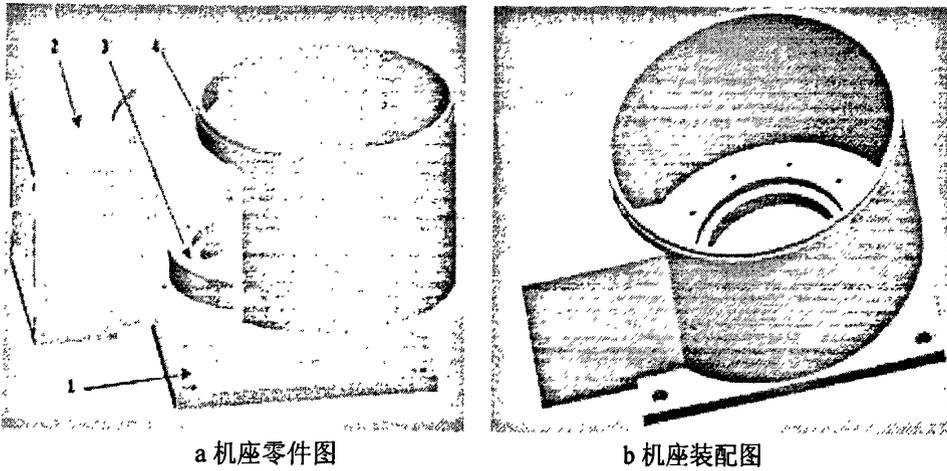


图 3-1 机座结构图

Fig.3-1 The construction drawing of the robot's base

机座零件表:

表 3-2 机座零件明细

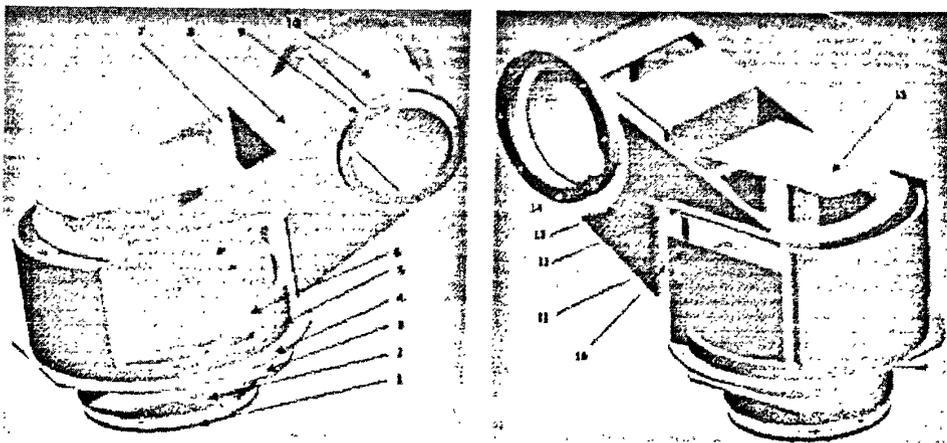
tab.3-2 parts list of the robot's base

编号	加工及装配
1	零件 1 为机座底板, 经过铣, 钻而成, 通过四个地脚螺钉和工作台相联结
2	零件 2 经过线割, 钻而成, 和零件 1 以及 4 焊接, 为机器人控制线和电线通道开口
3	零件 3 是腰部谐波减速器机座, 经过车, 铣, 钻而成, 焊接在 1 上
4	零件 4 经过车铣而成, 焊接在零件 1 上, 和零件 3 有同轴度要求

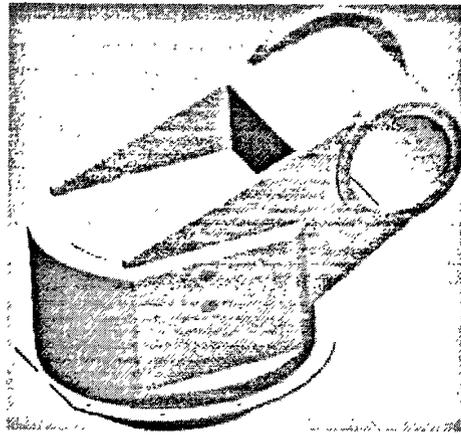
机座零件 1 铣有一个小圆面, 用于和零件 3 的装配。

## 2) 腰部

焊接机器人的腰部也是一个受力比较大的部件, 故采用钢结构件。腰部结构较复杂, 内部加工比较困难, 对于单件生产的焊接机器人, 其腰部采用的比较合适的加工方式是焊接结构钢。如图 3-2 所示, 腰部共分为 16 个零件。



a 腰部零件图



b 腰部装配图

图 3-2 腰部结构图

Fig.3-2 The construction drawing of the robot's waist

腰部零件表:

表 3-3 腰部零件明细

tab.3-3 parts list of the robot's waist

编号	加工及装配
1	零件 1 焊接在零件 2 上, 通过法兰和腰部的减速器连接
2	零件 2 经过车床加工而成, 固定在零件 3 上
3	零件 3 焊接在零件 5 上, 零件 1、2、3 组成了腰部连接机座的结构件
4	零件 4 焊接在零件 5 上, 用于腰部回转的限位
5	零件 5 是主要腰部主要受力部件之一, 和零件 3 有同轴度要求
6	零件 6 是腰部的侧板, 受力不是很大, 厚度设计为 1mm, 减少腰部的重量
7	零件 7 和零件 5、8、9、12、16 焊接, 腰部主要受力部件之一, 厚度设计为 7mm
8	零件 8 和零件 7、10、12、13 焊接, 为腰部主要受力部件之一, 厚度设计为 4mm
9	零件 9 和零件 7、10 焊接, 作为腰部和大臂辅助臂的连接部件
10	零件 10 和零件 8、9、14、16 焊接
11	零件 11 功能和零件 6 一样, 厚度为 1mm
12	零件 12 和零件 5、6、7、8、11、13 焊接
13	零件 13 和零件 7 功能相同, 和零件 5、8、12、14、16 焊接
14	零件 14 通过减速器和大臂主动臂连接, 和零件 9 有同轴度要求
15	零件 15 是腰部的顶盖
16	零件 16 是腰部的支撑板, 和零件 5、7、10、13 焊接

腰部通过大臂关节谐波减速器和大臂连接, 安装内置卡环限制大臂的转动范围。

### 3) 肘部

焊接机器人肘部连接大臂和小臂，同时在肘部上还需要固定送丝机构，所以其强度应该得到保证，同时肘部里面需要安装两个电机，其内部空间的分配也应充分考虑。综上所述，肘部和腰部一样采用焊接结构钢而成。结构图如图 3-3 所示：

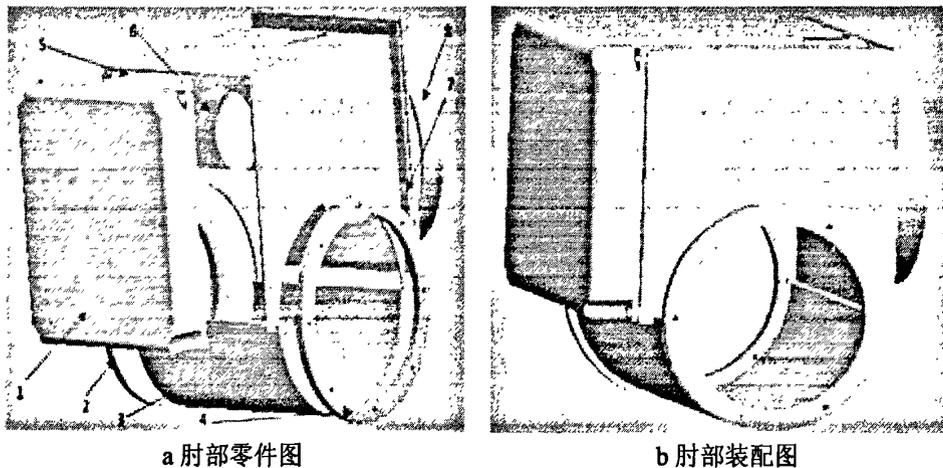


图 3-3 肘部结构图

Fig.3-3 The construction drawing of the robot's elbow

肘部零件表：

表 3-4 肘部零件明细

tab.3-4 parts list of the robot's elbow

编号	加工及装配
1	零件 1 为肘部盖，用铝合金铣钻加工
2	零件 2 用于安装大臂主动臂和肘部之间的减速器，和零件 2、4 焊接
3	零件 3 用于支撑零件 2 和 5
4	零件 4 用于安装大臂辅助臂和肘部之间的轴承座，和零件 2、4 焊接
5	零件 5 采用折弯钢板的形式，通过线割，铣加工而成，左右的半圆有同轴度要求
6	零件 6 焊接在零件 5 上，用于安装小臂驱动电机
7	零件 7 和零件 3、5 焊接，厚度为 5mm
8	零件 8 焊接在零件 7 上，一起用于安装小臂部的谐波减速器

肘部零件 7 铣有三个槽，用于和零件 5 的装配，以提高定位精度。

#### 3.4.2 大臂、小臂和腕部的制造

机器人大臂、小臂和腕部采用机床加工。材料选用铝合金，型材的加工，其强度是足够的。密度较低的铝合金可以尽量使大小臂和腕部的运动惯量小，利于提高机器人工作精度。

1) 大臂

大臂的结构相对于腰部要简单一些，作为机器人最主要的部件，大臂的性能是影响焊接精度的主要因素。为了使大臂运动时腰部受力平衡，同时也考虑到控制线路的布置，大臂部分设计成大臂主动臂和辅助臂，主动臂传递运动，辅助臂起到受力均衡和布置线路的作用。在设计中为减小大臂的运动惯量。大臂的材料选择铝合金。大臂的结构如图3-4所示：

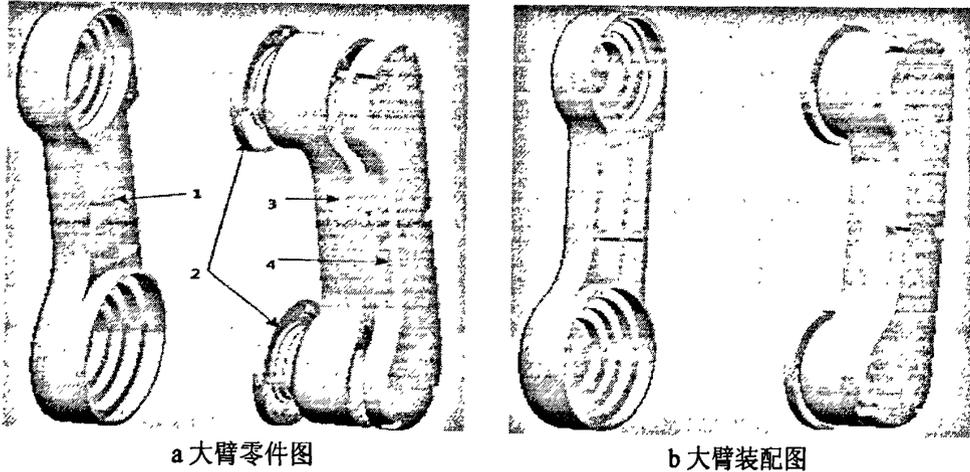


图 3-4 大臂结构图

Fig.3-4 The construction drawing of the robot's large arm

大臂零件表：

表 3-5 大臂零件明细  
tab.3-5 parts list of the robot's large arm

编号	加工及装配
1	大臂主动臂，用铝合金线割，车铣钻加工
2	大臂辅助臂轴承座，车铣钻加工
3	大臂辅助臂，铝合金线割，车铣钻加工
4	大臂辅助臂盖，铝合金线割，车铣钻加工

大臂主动臂由一整块铝合金加工而来，上部安装连接肘部的减速器，下部连接机器人腰部。辅助臂通过两个滚动轴承分别和腰部以及肘部相连。

2) 小臂

小臂连结肘部和腕部，绕关节轴的旋转来调整焊枪的姿态。小臂的结构参照大臂样式，采用双臂支撑。由于机器人后端的零部件尽量采用质量轻的材料，采用铝合金作为小臂的材料。驱动腕部的电机安装在小臂靠近肘部的位置，用皮带传递运动。结构如图3-5所示。

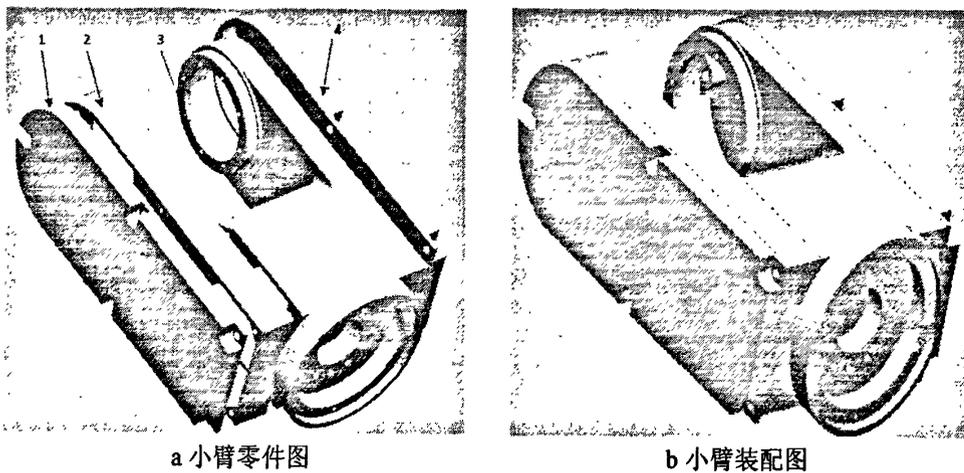


图 3-5 小臂结构图

Fig.2-10 The construction drawing of the robot's small arm

小臂零件表:

表 3-6 小臂零件明细

tab.3-6 parts list of the robot's small arm

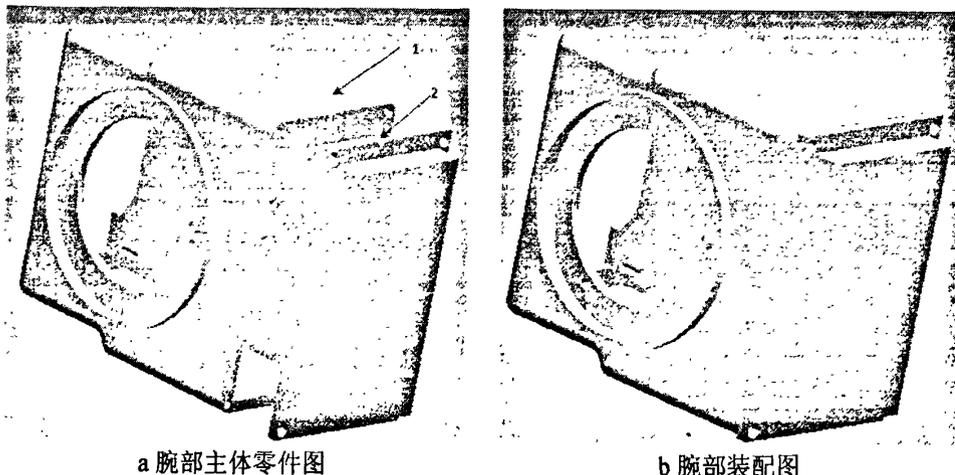
编号	加工及装配
1	零件 1 是小臂左盖, 铝合金铣钻加工而成
2	零件 2 为小臂的左臂, 用于安装控制线和电线, 连结腕部。铝合金机床加工
3	零件 3 为小臂右臂, 安装驱动腕部的电机, 谐波减速器, 铝合金机床加工
4	零件 4 为小臂右盖, 铝合金铣钻加工

考虑到零件 3 的可加工性, 在设计中把零件 2 从零件 3 中分解出来, 单独加工, 再通过螺钉和零件 3 连接。

### 3) 腕部

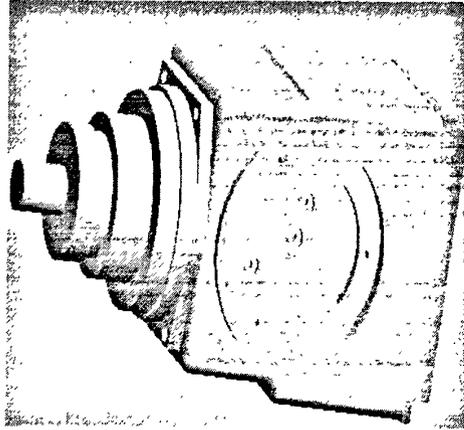
腕部位于机器人的最末端, 工具就安装在腕部, 腕部也是采用铝合金加工的方式。

结构图如图 3-6 所示:



a 腕部主体零件图

b 腕部装配图



c 腕部和末端连接

图 3-6 腕部结构图

Fig.3-6 The construction drawing of the robot's wrist

腕部零件表:

表 3-7 腕部零件明细

tab.3-7 parts list of the robot's wrist

编号	加工及装配
1	腕部主体, 铝合金线割, 铣钻加工
2	腕部盖, 铝合金线割, 铣钻加工

### 3.4.3 各部件的总装

经过各部件的设计, 最后完成装配, 装配以后在 Pro/E4.0 中检测整机的全局干涉。出现干涉的地方会有突显的颜色标识。这样对相应部位进行修改, 直到干涉消除, 最后完成总装图, 如下图所示:

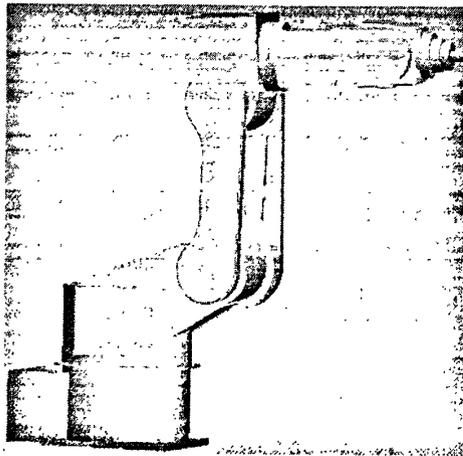


图 3-7 焊接机器人装配图

Fig.3-7 The assembly drawing of welding robot

### 3.5 本章小结

在本章在前面一章的基础上。结合目前单件生产机器人的加工条件，重点分析了焊接机器人机座、腰部和肘部等三个复杂部件制造方法的可行性。从工艺和成本上对铸造和焊接两种制造方式进行了比较。分析得知在单件生产条件下，在制造工艺和成本上，焊接制造都具有明显的优势，确定拼焊多零件作为机器人三个关键部件加工方式。在此基础上对三部件的结构设计原则和焊接工艺原则进行了分析。本章还对机器人大臂、小臂和腕部的设计和制造进行了较详细的表述。最后对各部件进行装配。

## 第四章 焊接机器人运动学分析

### 4.1 引言

上一章介绍了焊接机器人的总体设计, 机器人各连杆的尺寸和连接方式得以确定在本章中将运用 D-H 法对焊接机器人的运动学进行分析, 建立运动学模型, 解出运动学方程的正、逆解。为对焊接机器人实施仿真分析提供参数和依据。

### 4.2 位姿描述和齐次变换

在研究机器人运动情况时, 各杆件通常被看作是刚体。刚体坐标点的位置和姿态统称为刚体的位姿。主要的描述方法包括矢量法、齐次变换法、四元数法和旋量法等, 其中齐次变换法是比较常用的。机器人各杆件的运动是转动和平移。本文用齐次变换法描述机器人各杆件的运动。齐次坐标是用  $n+1$  维坐标来描述  $n$  维空间中的位置<sup>[46-48]</sup>。

#### 4.2.1 平移坐标变换

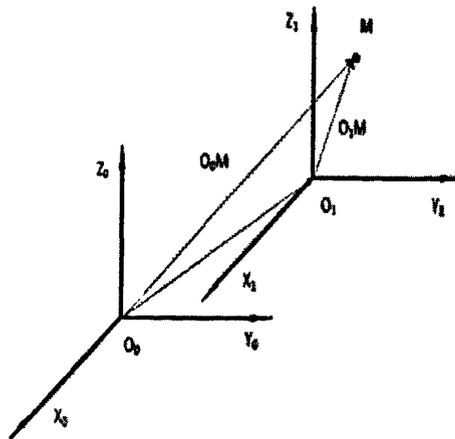


图 4-1 坐标系平移

Fig.4-1 Parallel moving coordinate systems

如图 4-1 所示, 坐标系  $O_1X_1Y_1Z_1$  相对于坐标系  $O_0X_0Y_0Z_0$  平移了  $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ 。空间有一点 M, 点 M 在坐标系  $O_1X_1Y_1Z_1$  中的坐标为  $(x, y, z)$ , 在坐标系  $O_0X_0Y_0Z_0$  中的坐标为  $(x', y', z')$ , 则坐标值有如下联系:

$$\left. \begin{aligned} x' &= x + \Delta x \\ y' &= y + \Delta y \\ z' &= z + \Delta z \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

写矩阵形式为:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta x \\ 0 & 1 & 0 & \Delta y \\ 0 & 0 & 1 & \Delta z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

简写形式为:

$$m' = Trans(\Delta x, \Delta y, \Delta z)m \quad (4.3)$$

其中,  $Trans(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$  是平移算子:

$$Trans(\Delta x, \Delta y, \Delta z) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta x \\ 0 & 1 & 0 & \Delta y \\ 0 & 0 & 1 & \Delta z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

平移算子中的第四列元素  $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$  分别为沿坐标轴 X, Y, Z 的移动量。

若坐标变换是相对于固定坐标系, 则算子左乘。如果是相对于动坐标系, 算子右乘。

#### 4.2.2 旋转坐标变换

下面介绍旋转坐标变换:

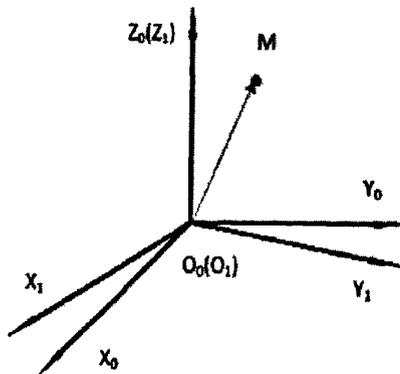


图 4-2 坐标系旋转

Fig.4-2 rotating coordinate systems

如上图所示, 坐标系  $O_1 X_1 Y_1 Z_1$  绕坐标系  $O_0 X_0 Y_0 Z_0$  的  $Z$  轴旋转  $\theta$ , 空间点  $M$  在坐标系  $O_1 X_1 Y_1 Z_1$  中的坐标为  $(x, y, z)$ , 在坐标系  $O_0 X_0 Y_0 Z_0$  中的坐标为  $(x', y', z')$ , 则各坐标元素有如下关系:

$$\left. \begin{aligned} x' &= \cos\theta x - \sin\theta y \\ y' &= \sin\theta x + \cos\theta y \\ z' &= z \end{aligned} \right\} \quad (4.5)$$

写成矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

简写形式为:

$$m' = Rot(z, \theta)m \quad (4.7)$$

$Rot(z, \theta)$  表示齐次坐标变换时绕  $z$  轴的旋转算子。

$$Rot(z, \theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

和坐标平移变换一样, 如果是相对于固定坐标系平移, 则左乘算子。如果是相对于动坐标系平移, 则右乘算子。

同理, 可求得绕  $X$  轴旋转和绕  $Y$  轴旋转的旋转算子:

$$Rot(x, \theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

$$Rot(y, \theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

平移坐标变换和旋转坐标变换不仅适用于坐标系的变换，还适用于矢量，物体的变换计算。相对于固定坐标变换时，算子左乘；相对于动坐标系变换，算子右乘。

### 4.3 正运动学分析

机器人运动学分析包括正运动分析和逆运动分析。正运动分析是已知机器人各关节的参数，求解机器人末端的位置和轨迹；逆运动分析是已知机器人末端的运动位置和轨迹，求解机器人各关节的运动。机器人运动学问题的正解问题比较简单，逆解问题相对复杂。描述和求解机器人运动学问题的方法很多。主要包括：拉格朗日欧拉方程、牛顿欧拉方程、广义达朗贝尔方程、凯恩方程等等<sup>[49~51]</sup>。本文运用拉格朗日欧拉方程法来分析。

#### 4.3.1 机器人连杆坐标系的 D-H 建立方法与齐次变换矩阵

D-H 法是 1955 年由 Denavit 和 Hartenberg 提出的一种描述机器人连杆相对位姿的矩阵方法。它是思想是利用 4×4 齐次变换矩阵描述相邻两连杆的空间关系，以此确定各个连杆相对于固定参考坐标系的空间几何关系，从而推导出末端工具相对于机座的变换关系，建立机器人的运动方程<sup>[52~59]</sup>。机器人杆件结构如图 4-3 所示：

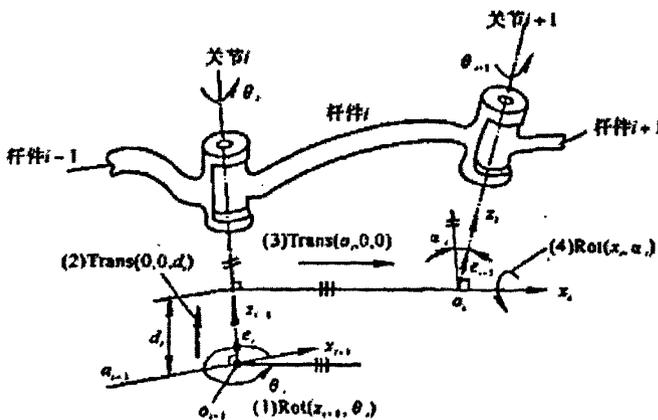


图 4-3 机器人连杆参数

Fig.4-3 The link frame of robot

D-H 方法定义了每个连杆和关节的四个参数。任意连杆  $i$  由两个参数描述：连杆长度  $a_i$  和扭角  $\alpha_i$ ；相邻连杆的关系也由两个参数表示：偏置  $d_i$ ，关节角  $\theta_i$ 。

连杆  $i$  是由关节轴线  $i$  和  $i+1$  的公法线长度  $a_i$  和夹角  $\alpha_i$  所决定的。 $a_i$  是关节  $i$  轴线和关节  $i+1$  轴线的公垂线， $\alpha_i$  是关节  $i$  轴线和关节  $i+1$  轴线的夹角。偏置  $d_i$  是关节  $i-1$  的轴线  $Z_{i-1}$  和关节  $i$  的轴线  $Z_i$  的公垂线与关节轴线  $i$  和  $i+1$  的公垂线在关节  $i$  轴线方向上的距离。沿轴  $Z_i$  正向时为正，反之为负。关节角  $\theta_i$  是关节轴线  $Z_{i-1}$  和  $Z_i$  的公垂线与关节轴线  $Z_i$  和  $Z_{i+1}$  的公垂线绕轴线  $Z_i$  的夹角。在移动关节中， $d_i$  是变量，其他三个参数是固定值。在旋转关节中，关节角  $\theta_i$  是变量，其他三个参数是固定值。

本课题的焊接机器人由六个连杆通过旋转关节串联而成。对焊接机器人进行运动学分析就是要建立焊接机器人运动学方程，确定个连杆之间的关系。通过各关节的运动求解末端的位置和运动，同时通过末端的位置和运动来推算关节的运动。首先，我们将为机器人的每一连杆建立一个坐标系，并用齐次变换来描写这些坐标系间的相对位置和姿态。在机座上设置基础坐标系  $\{x_0, y_0, z_0\}$ ，作为整个机器人的参考坐标系。在连杆 1 设置坐标系  $\{x_1, y_1, z_1\}$ 。以此类推，与连杆  $i$  固接的坐标系为  $\{x_i, y_i, z_i\}$ 。建立的机器人各连杆的坐标系，确定其结构参数。

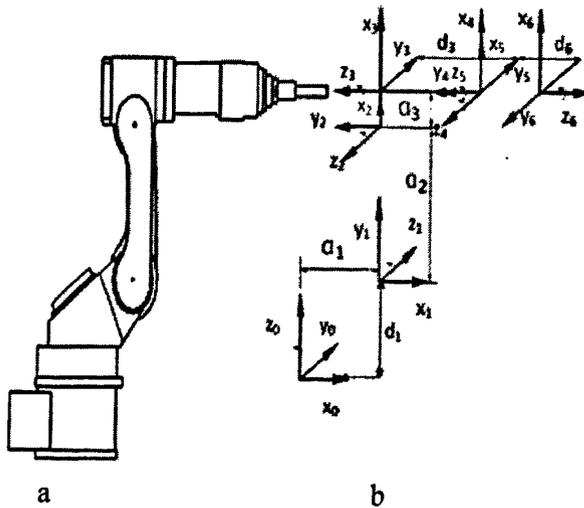


图 4-4： 焊接机器人结构简图和坐标系  
 Fig.4-4 The Configuration sketch and coordinate systems of the robot links

表 4-1 焊接机器人连杆参数

Tab.4-1 The parameters of link of welding robot

关节 i	$a_i(\text{mm})$	$\alpha_i(^{\circ})$	$d_i(\text{mm})$	$\theta_i(^{\circ})$	关节转动范围 ( $^{\circ}$ )
1	150	-90	165	$\theta_1$	$\pm 170$
2	260	180	0	$\theta_2$	+150,-45
3	60	-90	0	$\theta_3$	+190,-70
4	0	90	-300	$\theta_4$	$\pm 180$
5	0	-90	0	$\theta_5$	$\pm 135$
6	0	180	-240	$\theta_6$	$\pm 150$

机器人 i 连杆的坐标系  $\{x_i, y_i, z_i\}$  可以经过以下四个子变换得到:

- 1) 绕  $z_{i-1}$  轴转动  $\theta_i$  角, 记为  $\text{Rot}(z_{i-1}, \theta_i)$
- 2) 沿着  $z_{i-1}$  轴移动  $d_i$ , 记为  $\text{Tans}(0, 0, d_i)$
- 3) 沿  $x_i$  轴平移  $a_i$ , 记为  $\text{Tans}(a_i, 0, 0)$
- 4) 绕着  $x_i$  轴转动  $\alpha_i$ , 记为  $\text{Rot}(x_i, \alpha_i)$

则机器人相邻杆件坐标变换的表达式为:

$${}^{i-1}T_i = \text{Rot}(z_{i-1}, \theta_i) \text{Tans}(0, 0, d_i) \text{Tans}(a_i, 0, 0) \text{Rot}(x_i, \alpha_i)$$

即:

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

### 4.3.2 运动学的正解

由上节求得相邻杆件的坐标变换关系。机器人各连杆结构参数分别代入式(4.11), 可得六个变换矩阵:

$$\begin{aligned}
 {}^0T_1 &= \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & 0 & -\sin\theta_1 & 150\cos\theta_1 \\ \sin\theta_1 & 0 & \cos\theta_1 & 150\sin\theta_1 \\ 0 & -1 & 0 & 165 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & {}^1T_2 &= \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & \sin\theta_2 & 0 & 260\cos\theta_2 \\ \sin\theta_2 & -\cos\theta_2 & 0 & 260\sin\theta_2 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 {}^2T_3 &= \begin{bmatrix} \cos\theta_3 & 0 & -\sin\theta_3 & 60\cos\theta_3 \\ \sin\theta_3 & 0 & \cos\theta_3 & 60\sin\theta_3 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & {}^3T_4 &= \begin{bmatrix} \cos\theta_4 & 0 & \sin\theta_4 & 0 \\ \sin\theta_4 & 0 & -\cos\theta_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -300 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 {}^4T_5 &= \begin{bmatrix} \cos\theta_5 & 0 & -\sin\theta_5 & 0 \\ \sin\theta_5 & 0 & \cos\theta_5 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & {}^5T_6 &= \begin{bmatrix} \cos\theta_6 & \sin\theta_6 & 0 & 0 \\ \sin\theta_6 & -\cos\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -240 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{4.12}$$

焊接机器人末端工具上的坐标系在基础坐标系中的位置和姿态就是焊接机器人的位姿方程，把上述几个变换矩阵连乘可得焊接机器人末端工具相对于基坐标系的变换位姿矩阵为：

$${}^0T_6 = \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x & p_x \\ n_y & s_y & a_y & p_y \\ n_z & s_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 {}^5T_6 \tag{4.13}$$

其中 ${}^0T_6$ 是末端连杆坐标系 $\{x_i, y_i, z_i\}$ 相对于基坐标系 $\{x_0, y_0, z_0\}$ 的位姿矩阵，它是机器人运动学分析的基础。

$$\begin{aligned}
 n_x &= c1c2c3c4c5c6 + c1s2s3c4c5c6 - s1s4c5c6 - c1s2c3s5c6 \\
 &+ c1s2c3s5c6 - c1c2c3s4s6 - c1s2s3s4s6 - s1c4s6
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 s_x &= c1c2c3c4c5c6 + c1s2s3c4c5c6 - s1s4c5s6 - c1c2c3s5s6 + c1s2c3s5s6 \\
 &+ c1c2c3s4c6 - c1s2s3s4c6 - s1c4c6
 \end{aligned}$$

$$a_x = c1c2c3c4c5 + c1s2s3c4s5 - s1s4s5 + c1c2c3c5 - c1s2s3c5$$

$$\begin{aligned}
 p_x &= 240(c1c2c3c4s5 + c1s2s3c4s5 - s1s4s5 + c1c2c3c5 - c1s2c3) \\
 &+ 300(c1c2s3 - c1s2c3) + 60(c1c2c3 + c1s2s3) + 260c1c2 + 150c1
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
N_y &= s1c2c3c4c5s6 + s1s2s3c4c5s6 + c1s4c5s6 - s1c2s3s5s6 + s1s2c3s5s6 \\
&+ s1c2c3s4c6 - s1s2s3s4c6 - c1c4c6 \\
S_y &= s1c2c3c4c5s6 + s1s2s3c4c5s6 + c1s4c5s6 - s1c2s3s5s6 + s1s2c3s5s6 \\
&+ s1c2c3s4c6 - s1s2s3s4c6 - c1c4c6 \\
a_y &= s1c2c3c4c5 + s1s2s3c4c5 + c1s4s5 + s1c2s3c5 - s1s2c3c5 \\
P_y &= 240(s1c2c3c4s5 + s1s2s3c4s5 + c1s4s5 + s1c2s3c5 - s1s2c3c5) \\
&+ 300(s1c2c3 - s1s2c3) + 60(s1c2c3 + s1s2s3) + 260s1c2 + 150s1 \\
n_z &= -s2c3c4c5c6 + c2s3s4c5c6 + s2s3s5c6 + s2c3s5c6 + s2c3s4s6 + c2s3c4s6 \\
S_z &= -s2c3c4c5s6 + c2s3s4c5s6 + s2s3s5s6 + c2c3s5s6 - s2c3s4c6 - c2s3c4c6 \\
a_z &= -s2c3c4s5 + c2s3s4s5 - s2s3c5 - c2c3c5 \\
P_z &= -240(s2c3c4s5 - c2s3s4s5 + c2s3c5) - 300(s2c3 + c2c3) - 60(s2c3 - \\
&c2s3) - 260s2
\end{aligned} \tag{4.14}$$

在上述格式中： $ci = \cos\theta_i$ ， $si = \sin\theta_i$ 。代入关节变量就可以求得焊接机器人末端工具相对基础坐标系的位置和姿态。

### 4.3.3 运动学数学模型的验证

在上面两节中，我们已经确定了机器人运动学模型，但是模型是否正确还有待证明。这一节就其运动学模型的正确性进行验证。把机械手初始位置时的关节变量 $\theta_1 = 0^\circ$ 、 $\theta_2 = 90^\circ$ 、 $\theta_3 = 0^\circ$ 、 $\theta_4 = 0^\circ$ 、 $\theta_5 = 0^\circ$ 、 $\theta_6 = 0^\circ$ 代入式 (4.13) 中得：

$${}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 {}^5T_6 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 690 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 485 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{4.15}$$

即末端执行器参考点在基坐标系中的初始位置坐标为  $(p_x, p_y, p_z) = (690, 0, 485)$ 。由图 4-4 计算焊接机器人在初始位置时末端执行器相对于基坐标系的出事坐标为： $(150+300+240, 0, 165+260+60)$ ，即  $(690, 0, 485)$  与由坐标变换矩阵计算得到的结果完全一致。

### 4.4 逆运动学分析

机器人正逆运动学的关系如下图所示。

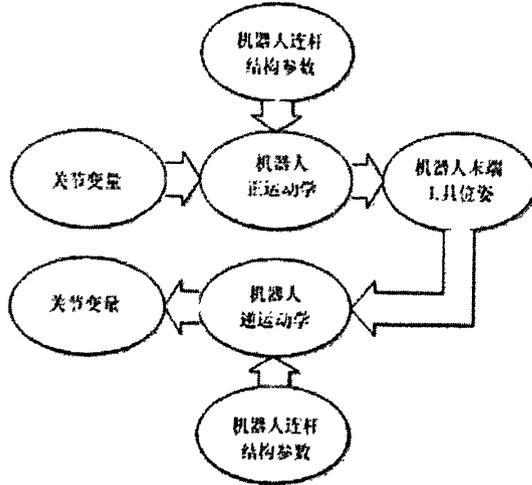


图 4-5 机器人正运动学和逆运动学

Fig.4-5 The positive problem and negative problem of robot location kinematics

逆运动学求解方法有 Paul 提出的解析法和代数法、Lee 和 Ziegler 的几何法及 Pieper 法等<sup>[60~65]</sup>。本研究采用的是代数法对机器人逆运动学进行了求解，基本思路是在末端相对于基础坐标系的位姿矩 (4.13) 的两端左乘含有需求关节未知量的位姿矩阵的逆阵，使未知量左移，再利用矩阵元素对应相等求出未知量。

#### 1、求关节角 $\theta_1$ ：

用逆变换  ${}^0T_1^{-1}$  左乘， ${}^5T_6$  右乘到 (4.13) 的两端，

$$\begin{aligned}
 & {}^0T_1^{-1} {}^0T_6 = {}^0T_1^{-1} {}^1T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 {}^5T_6 \\
 & \begin{bmatrix} c_1 & s_1 & 0 & 0 \\ -s_1 & c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x & p_x \\ n_y & s_y & a_y & p_y \\ n_z & s_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 \quad (4.16)
 \end{aligned}$$

式中， ${}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5$  是已知量，由五个变换矩阵连乘而得。由 (4.16) 式中第三行第四列元素对应相等可得：

$$(-s_1 a_x + c_1 a_y) d_6 + c_1 p_y - s_1 p_x = 0 \quad (4.17)$$

$$\tan(\theta_1) = \frac{d_6 a_y + p_y}{d_6 a_x + p_x}$$

所以:

$$\theta_1 = \arctan(d_6 + p_y, d_6 a_x + p_x)$$

或者

$$\theta_1 = \arctan(d_6 + p_y, d_6 a_x + p_x) + \pi$$

2、求关节角  $\theta_2$ :

用逆变换  ${}^0T^{-1} {}^1T^{-1}$  左乘 (4.13) 式两边, 得:

$${}^0T^{-1} {}^1T^{-1} {}^6T = {}^2T {}^3T {}^4T {}^5T$$

$$\begin{bmatrix} c_1 c_2 & s_1 c_2 & -s_2 & -a_1 c_2 \\ -c_1 s_2 & -s_1 s_2 & -c_2 & a_1 s_2 \\ -s_1 & c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x & p_x \\ n_y & s_y & a_y & p_y \\ n_z & s_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = {}^2T {}^3T {}^4T {}^5T \quad (4.18)$$

由 (4.18) 式中元素第一行第四列和第二行第四列分别对应相等, 得:

$$c_3 [-d_6 (c_1 a_x + s_1 a_y) + (c_1 p_x + s_1 p_y - a_1)] = c_3 a_3 + s_3 d_4 + a_2$$

$$s_3 [-d_6 (c_1 a_x + s_1 a_y) + (c_1 p_x + s_1 p_y - a_1)] = -s_3 a_3 + c_3 d_4 \quad (4.19)$$

所以:

$$\theta_2 = \pm \arctan \frac{c_3 d_4 - a_3 s_3}{c_3 a_3 + s_3 d_4 + a_2}$$

3、求关节角  $\theta_3$ :

分别用  ${}^0T^{-1} {}^1T^{-1}$  左乘,  ${}^5T^{-1}$  右乘 (4.13) 式两边。得:

$${}^0T^{-1} {}^1T^{-1} {}^6T = {}^2T {}^3T {}^4T {}^5T \quad (4.20)$$

$$\begin{bmatrix} c3c4c5-s3s5 & c3s4 & c3c4s5+s3c5 & -d4s3+a3c3 \\ s3c4c5+c3s5 & s3s4 & s3c4s5-c3c5 & d4c3+a3s3 \\ -s4c5 & c4 & -s4s5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x & p_x \\ n_y & s_y & a_y & p_y \\ n_z & s_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5$$

利用上式第四列的元素对应相等可得:

$$-d4s3+a3c3=c2[(c1ax+s1ay)d6+c1px+s1py-a1]+s2(-a2d6-pz)-a2 \quad (4.21)$$

$$d4c3+a3s3=s2[(c1ax+s1ay)d6+c1px+s1py-a1]-c2(-a2d6-pz)$$

可得 $\theta_3$ :

$$\theta_3 = -\arctan \frac{a3}{d4} \pm \arctan \frac{a3c3+d4s3}{\sqrt{r3^2-(a3c3+d4s3)^2}} \quad (4.22)$$

同理可求得:

$$\theta_4 = \arctan \frac{\pm \sqrt{[c6(s1nx-c1ny)-s6(s1ox-c1oy)]^2 + (s1ax-c1ay)^2}}{c6(s1ox-c1oy)}$$

$$\theta_5 = \arctan \frac{s1ax-c1ay}{c6(s1nx-c1ny)-s6(s1ox-c1oy)} \quad (4.23)$$

$$\theta_6 = -\arctan \frac{c1c2ox+c2s1oy}{c1c2nx+c2s1ny} \pm \arctan \frac{s3}{\sqrt{(c1c2nx+c2s1ny)^2 + (c1c2ox+c2s1oy)^2 - s3^2}}$$

这样, 解出该机器人的逆运动学 16 组解。

#### 4.5 本章小结

本章介绍了与机器人运动学相关的数学基础, 包括平移和旋转齐次坐标变换。分析了焊接机器人各连杆的参数, 用 D-H 方法构建机器人连杆坐标系, 得到相邻连杆间的变换矩阵。最后建立运动学模型, 解出了运动学方程的正、逆解。并进行了验证。为对焊接机器人实施仿真分析和运动控制提供了参数和依据。

## 第五章 基于 ADAMS 的焊接机器人运动仿真分析

### 5.1 引言

在前面一章我们对六自由度焊接机器人做了运动学分析。在本章中，我们将利用 PRO/E4.0 建立焊接机器人的三维模型，再在仿真软件 ADAMS R3 中导入三维模型，进行焊接机器人动力学和运动学仿真。观察焊接机器人的运动过程，测量运动的轨迹和坐标参数；分析了机械人在运动过程中的关节受力情况。

焊接机器人运动学研究是把机器人相对于固定参考坐标系的运动，而不考虑在这个运动中机器人受到和对外界施加的力和力矩。也就是要把焊接机器人的空间位移表示为时间的函数。尤其要研究机器人末端工具的位姿、速度和加速度以及它和关节变量的关系。焊接机器人的运动学分析是机器人在机器人控制中运动学分析占有非常重要的地位，直接关系到离线编程、轨迹规划的问题。在运动分析的过程中，运动仿真是一个重要的方法。机器人运动仿真主要是为了在产品开发阶段，了解所开发的机器人实现预定轨迹运动时各关节及连杆所反映出的运动学特性、产品在给定输入运动下的动作过程及机器人的综合性能。通过给机器人末端预定运动，逆向测得机器人各关节的运动数据。其仿真结果对机器人产品开发及结构优化设计等提供依据<sup>[66]</sup>。

多体动力学是在欧拉、拉格朗日等人的经典刚体动力学基础上发展而来的一个力学分支。多体动力学是研究由多个刚体或柔体相互连接而成成的多体系统运动规律的一门科学。在研究焊接机器人的动力学时，一般把它看作是多刚体系统。焊接机器人动力学的研究内容包括：1) 根据关节驱动力和力矩，求解机器人的关节位移、速度、加速度；2) 根据机器人各关节的位移、速度、加速度，求出所需的关节力或力矩。测得驱动机器人完成焊接任务所需的力或力矩，揭示机构的合理的运动方案和控制方式，为机器人设计提供依据。具有很好的实用价值。

### 5.2 虚拟样机技术介绍

虚拟样机技术(Virtual Prototyping Technology)是一种对事件的现实性从时间和空间上进行分解后重新组合的技术<sup>[67]</sup>。它是在产品研发过程中，先建立产品的整体模型，模拟各种工况进行仿真分析，预测其性能，从而改进设计，提供性能。

在传统的设计过程中，通常制造样机进行试验来验证设计，当发现问题时，又要改进设计再制造出样机验证。这个周而复始的过程不仅耗时，也使产品质量的竞争力受到了限制。虚拟样机技术的应用，使成本大大降低。软件平台的开发促进了虚拟样机技术的发展。目前比较有影响的虚拟样机软件包括 Virtual. Lab Motion, ADAMS 以及 SIMPACK 等。其中 ADAMS 是由美国机械动力学公司研发出来的。占据了目前虚拟样机软件市场半数以上的份额，本节将对 ADAMS 的主要功能进行了分析。

### 5.2.1 ADAMS 软件基本模块

ADAMS 软件由三个程序模块组成：ADAMS/View 模块、ADAMS/Solver 模块和 ADAMS/Processor 模块。如图 5-1 所示：

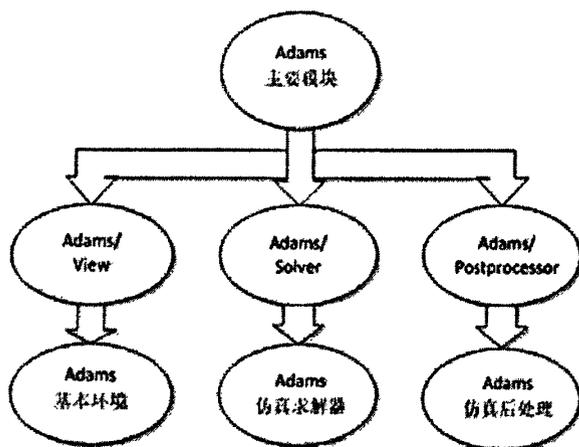


图 5-1 Adams 主要模块

Fig.5-1 Several central modules of software package ADAMS

ADAMS/View 模块是 ADAMS 的核心模块，为用户提供了基本的操作对话环境和仿真分析的前处理功能。ADAMS/Solver 模块提供建模和求解功能，解决工程应用问题。ADAMS/Processor 模块提供后处理功能，可以查看、编辑处理仿真结果。

### 5.2.2 ADAMS 软件仿真特点

ADAMS 进行仿真分析一般遵循以下几个基本步骤：

- (1) 建立或导入三维实体模型
- (2) 添加仿真模型的运动约束和驱动
- (3) 添加外部载荷力以及内部摩擦力等

(4) 仿真计算

(5) 读取结果

ADAMS 软件的特点如下:

(1) 建立机械系统三维参数化模型。

(2) 分析类型包括运动学、静力学以及非线性动力学分析。

(3) 拥有强大而准确的数值分析技术。

(4) 支持同大多数 CAD、FEA 和控制设计软件包之间的双向通信。

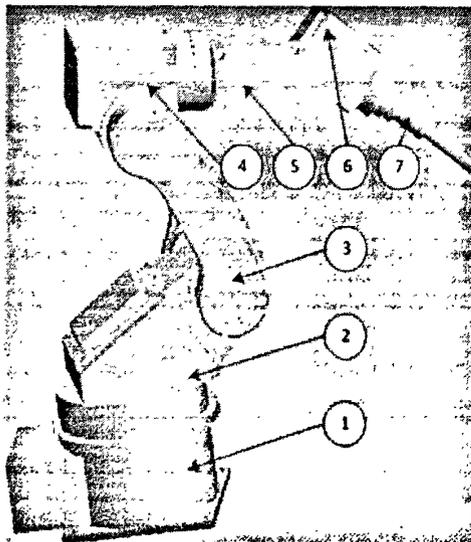
## 5.3 焊接机器人运动仿真

### 5.3.1 建立焊接机器人仿真模型

ADAMS 是一款优秀的运动和动力学仿真软件, Pro/E 软件具有强大的建模能力。本章讨论用 Pro/E4.0 软件建立六自由度焊接机器人的三维虚拟样机模型, 然后将虚拟样机模型导入 ADAMS 中进行运动学仿真。两者强强联合, 充分发挥各自的优势。

#### 1) 仿真建模

本课题选用 Pro/E 软件建立了机器人的三维实体模型, 主要包括:底座、腰部、大臂、小臂、手腕以及连杆等等。如图 5-2 所示:



1-机座, 2-腰部, 3-大臂, 4-肘部, 5-小臂, 6-腕部, 7-末端工具(焊枪)

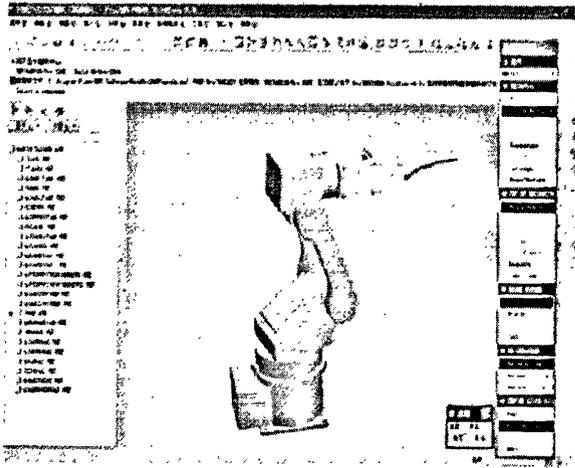
图 5-2 焊接机器人模型

Fig.5-2 the model of the welding robot

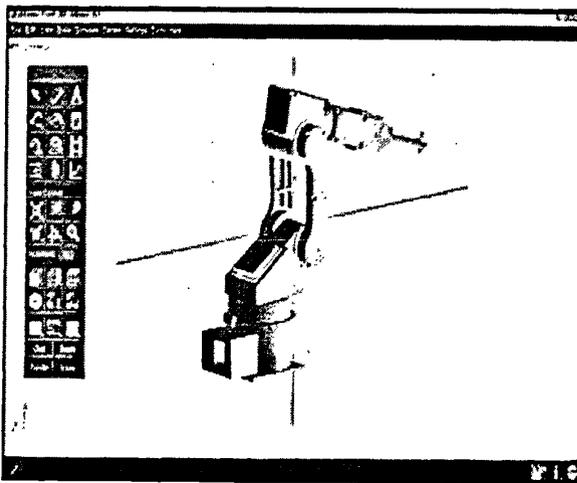
## 2) ADAMS 和 Pro/E 数据传递

对复杂的机械系统进行动力学仿真研究，实用的解决方案就是用专业的 CAD 软件建模，再导入 ADAMS 中仿真。但是所选用的 CAD 软件和 ADAMS 仿真软件通常不是同一家公司，这就存在一个“无缝联结”的问题。如果用 Pro/E 把保存为 IGES 等通用格式直接导入 ADAMS 中，会造成比较严重的的数据丢失，是仿真的精度大大降低。

对于 Pro/E 和 ADAMS 之间的数据传递，有一个比较实用的方法，就是安装由 MDI 公司开发的接口模块 Mechanism/Pro<sup>[67]</sup>。Mechanism/Pro 是连接 Pro/E 与 ADAMS 之间的桥梁。利用 Mechanism/Pro 接口模块，可以在 Pro/E 环境下直接把模型转成能被 ADAMS 读取的文件。如图 5-3 所示：



a



b

图 5-3 proe4.0 和 ADAMS R3 的数据传递

Fig5-3 The data transmission between ADAMS R3 and proe4.0

在通过 MECHANISM/Pro 导出模型的时候应注意的一点是 Pro/E 模型的单位设置跟 ADAMS 环境中要保持一致, 否则在数据转换的时候会提示出错误而无法完成。

### 5.3.2 机器人正运动仿真

在 ADAMS 导入焊接机器人模型, 对模型做必要的简化修改, 给每个电机定义一个参数, 对焊接机器人进行正运动仿真。测得各关节的受力情况以及关节速度和末端速度之间的联系。

#### 1) 设置重力

选择下拉菜单中的 Settings->Gravity, 把重力设置成-Y 方向。

#### 2) 定义装配体

在 ADAMS 中重新定义焊接机器人模型各个构件的名称。其中仿真环境里的全局坐标系建立在“ground”上, 它没有质量和自由度。在 ADAMS/View 的图形界面为焊接机器人的七个部件重命名, 依次为“jizuo”、“yaobu”、“dabi”、“xiaobi”、“wanbu”、“gongju”。

#### 3) 定义部件的材料

根据设计, 机器人的机座、腰部、肘部、末端工具为钢材, 大臂、小臂、腕部为铝合金。在 ADAMS/View 的图形界面里为机器人各部件定义材料。选择相应的部件, 单击右键选择 Modify 项, 弹出 Modify Body 对话框, 在 Define Mass By 中选择 Geometry and Material Type 项, 然后选择满足要求的材料, 点 OK 键确认。根据上面的步骤把七个部件的材料进行定义, 数据如下:

表 5-1 焊接机器人各部件的材料属性

Tab.5-1 The material properties each component of Welding robot

部件	材料	密度	弹性模量	泊松比
机座、腰部、肘部、末端工具	钢	7.801E-006	2.07E+005	0.29
大臂、小臂、腕部	铝合金	2.74E-006	7.1705E+004	0.33

单位: 密度-kg/mm<sup>3</sup> 弹性模量-n/mm<sup>3</sup>

#### 4) 定义运动副

ADAMS/View 提供的运动副要有 Translational Joint (移动副)、Revolute Joint (转动副)、Fixed Joint (固定副)、Spherical Joint (球副)、Cylindrical Joint (圆柱副) Curve constraint (凸轮副) 等。在本论文中焊接机器人各连杆的运动副均为转动副。机座和大地用固定幅相连。它们的约束情况如下表:

表 5-2 焊接机器人的运动副约束

Tab.5-2 The kinematic pairs of welding robot

运动副名	类型	部件 a	部件 b
JOINT-fix	固定副	机座 (jizuo)	大地 (ground)
J1	旋转副	腰部 (yanbu)	机座 (jizuo)
J2	旋转副	大臂 (dabi)	腰部 (yanbu)
J3	旋转副	肘部 (zhoubu)	大臂 (dabi)
J4	旋转副	小臂 (xiaobi)	肘部 (zhoubu)
J5	旋转副	腕部 (wanbu)	小臂 (xiaobi)
J6	旋转副	工具 (gongju)	腕部 (wanbu)

## 5) 设置关节驱动和工作载荷

为焊接机器人的六个关节添加驱动。根据现有的焊接机器人资料和焊接工作中的实际情况,确定接机器人六个关节的电机在经过谐波减速器减速以后输出的转动速度分别为: S 轴:  $30^\circ/\text{s}$ , L 轴:  $20^\circ/\text{s}$ , U 轴:  $30^\circ/\text{s}$ , R 轴:  $50^\circ/\text{s}$ , B 轴:  $20^\circ/\text{s}$ , T 轴:  $50^\circ/\text{s}$ 。所以为模型的六个关节各添加一个电机,然后用 step 函数加载速度,各电机的参数设置如下表。工具末端添加 50 牛顿的载荷,肘部要安放进送丝机构,故添加 100 牛顿的载荷。

表 5-3 机器人电机的参数

Tab.5-3 The motor data of welding robot

电机	参数
J1 电机 (M1)	step(time,3,0,4,-30d)+step(time,5,0,6,30d)+step(time,7,0,8,30d)+step(time,10,0,11,-30d)+step(time,14,0,15,-30d)+step(time,15,0,16,30d)
J2 电机 (M2)	step(time,0,0,1,20d)+step(time,2,0,3,-20d)+step(time,11,0,12,-20d)+step(time,13,0,14,20d)
J3 电机 (M3)	step(time,1,0,2,-30d)+step(time,3,0,4,30d)+step(time,5,0,6,30d)+step(time,6,0,7,-30d)
J4 电机 (M4)	step(time,4,0,5,50d)+step(time,6,0,7,-50d)+step(time,14,0,15,-50d)+step(time,16,0,17,50d)
J5 电机 (M5)	step(time,11,0,12,20d)+step(time,13,0,14,-20d)+step(time,16,0,17,-20d)+step(time,18,0,19,20d)
J6 电机 (M6)	step(time,7,0,8,50d)+step(time,10,0,11,-50d)

设置仿真的时间为 22s,步长为 500。经过仿真,得到每个关节角速度、角度变化、转矩情况以及末端速度、位移等相关数据:

6) 仿真数据

① 六个关节的角速度:

选择相应的关节, 单击右键选 Measure, 在弹出的对话框中设置角速度输出数据的名称, 在 characteristic 一项中选择 Relative Angular Velocity, 在 Component 一栏中选择有三个方向可选。其中腰部关节在一个方向上有输出数据, 其他关节在两个方向上有输出数据, 选 Component 栏中的 mag 项, 可得六个关节的综合角速度:

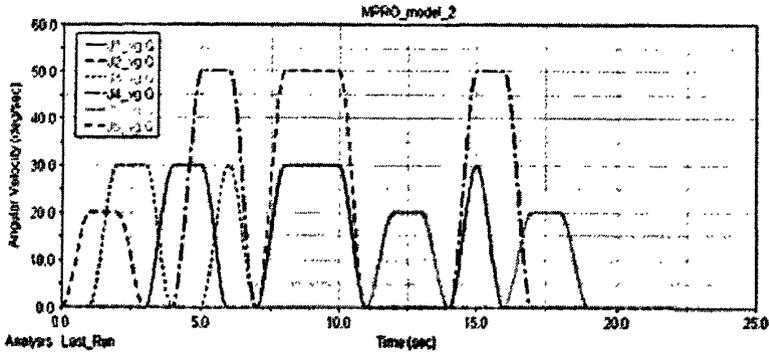
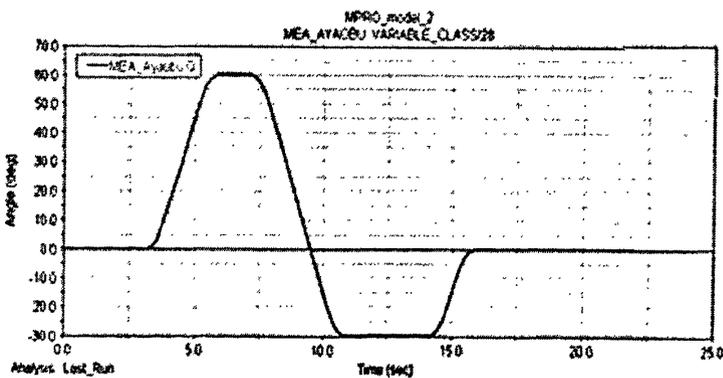


图 5-4 六个关节的转速

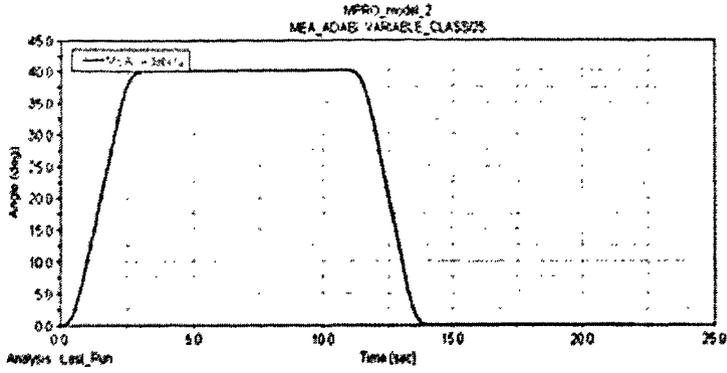
Fig.5-4 The speed of the six joints

② 六个关节的角度变化

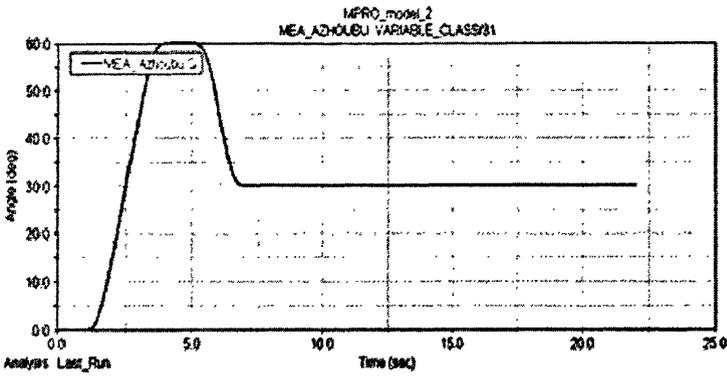
选择相应的关节, 单击右键选 Measure, 在弹出的对话框中为关节角命名, 在 characteristic 一项中选择 Ax/Ay/Az Projected Rotation, 在 Component 一栏 中选择 Z。这样就完成了角位移的测量, 按此方法可求得六个关节角位移: Ayaobu, Adabi, Azhoubu, Axiaobi, Awanbu, Agongju。



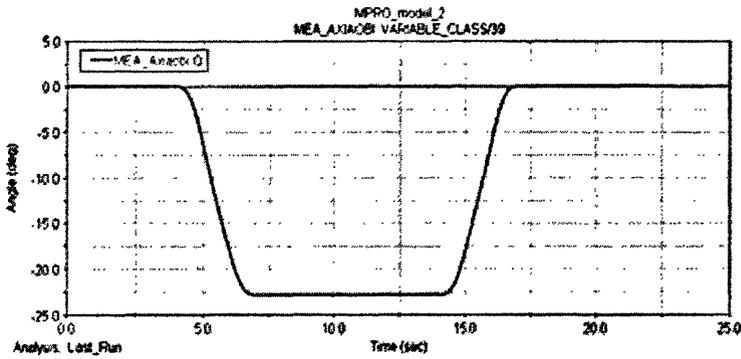
a 腰关节角度变化



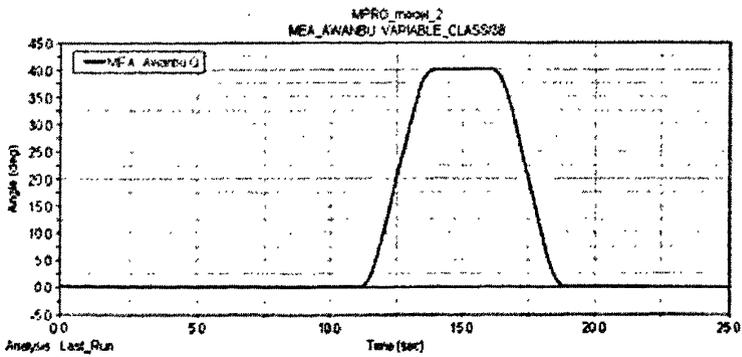
b 大臂关节角度变化



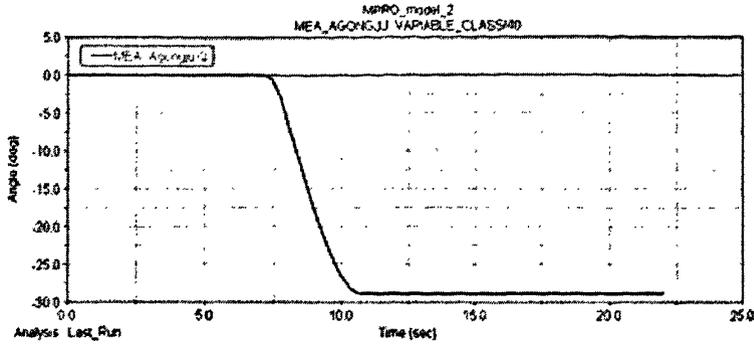
c 肘部关节角度变化



d 小臂关节角度变化



e 腕部关节角度变化



f 末端关节角度变化

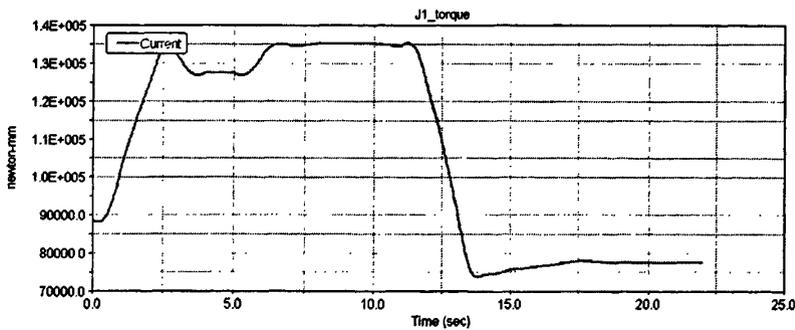
图 5-5 六个关节角度的变化情况

Fig.5-5 The changes in the angle of six joints

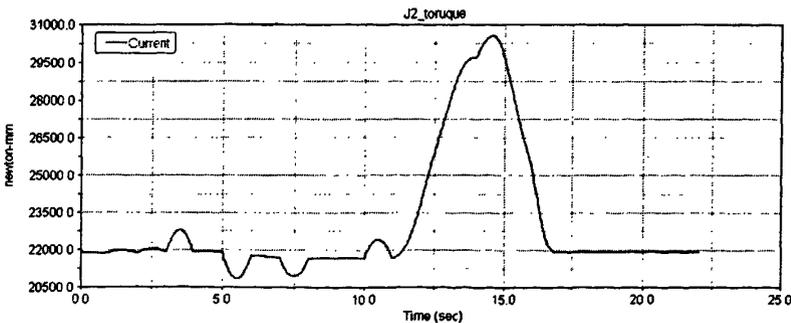
由图 5-5 图看出，腰部关节最大角为  $60^\circ$ ，大臂关节最大角为  $40^\circ$ ，肘部关节最大角为  $60^\circ$ ，小臂关节最大角为  $22.87^\circ$ ，腕部关节最大角为  $40^\circ$ ，末端工具关节最大角为  $28.95^\circ$ 。通过在关节上添加传感器可以进一步算得机器人的工作空间。

### ③ 六个关节的所受的力矩

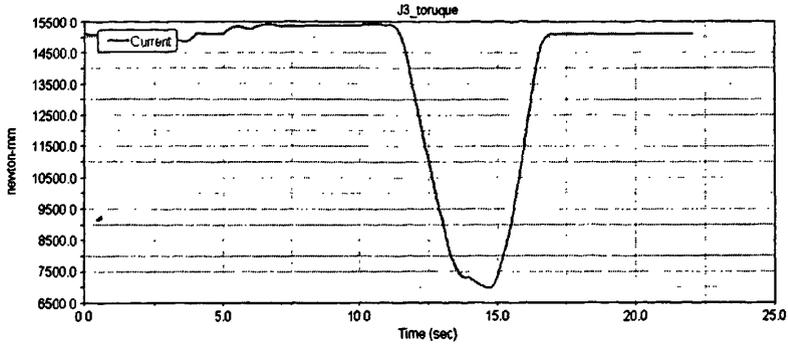
各关节的力矩也就是关节运动的驱动力矩，首先用鼠标右击点选 Motion，选择 measure,在出现对话框中输入 measure 名，在 characteristic 中选择 Torque Measure 项，在 Component 中选择方向，然后点击 OK，所测量到的各关节力矩如图 5-6 所示：



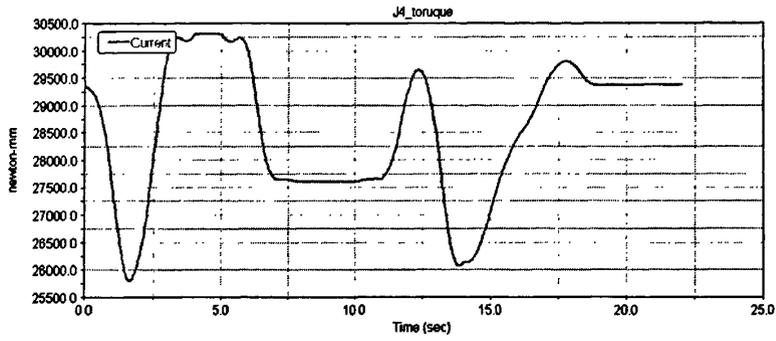
a 腰关节的力矩



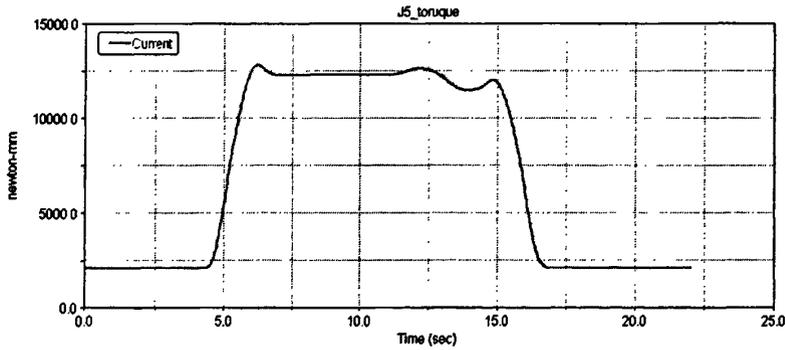
b 大臂关节的力矩



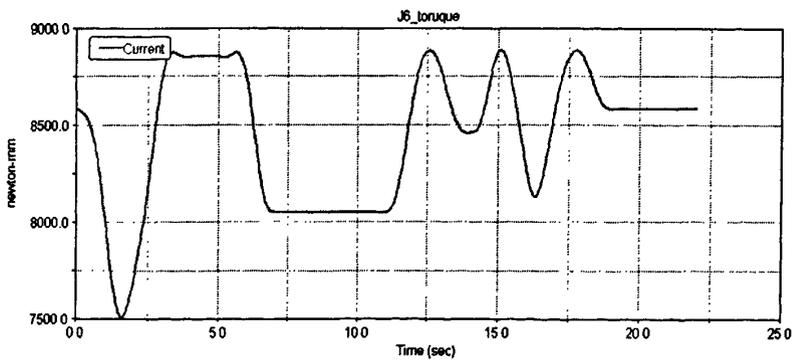
c 肘部关节的力矩



d 小臂关节的力矩



e 腕部关节的力矩



f 末端工具关节的力矩

图 5-6 各关节的转矩

Fig.5-6 The torque each joint of welding robot

上图中横坐标表示时间 T, 单位为 s, 纵坐标表示力矩, 单位 N.MM, 由上述各图可以看出, 焊接机器人的每个关节正常工作时, 其最大力矩如下表所示:

表 5-4 各关节受到的最大力矩 (单位: N.MM)

Tab.5-4 The maximum torque each joint(unit: N.MM)

关节	腰部关节	大臂关节	肘部关节	小臂关节	腕部关节	末端关节
最大力矩	$1.35 \times 10^5$	$3.056 \times 10^4$	$1.54 \times 10^4$	$3.03 \times 10^4$	$1.28 \times 10^4$	$8.7 \times 10^3$

根据所测量的峰值转矩便可以确定焊接机器人各关节驱动所需的电机的最大转矩和最大功率, 缩短了机器人设计的过程。

④ 末端的速度和位移

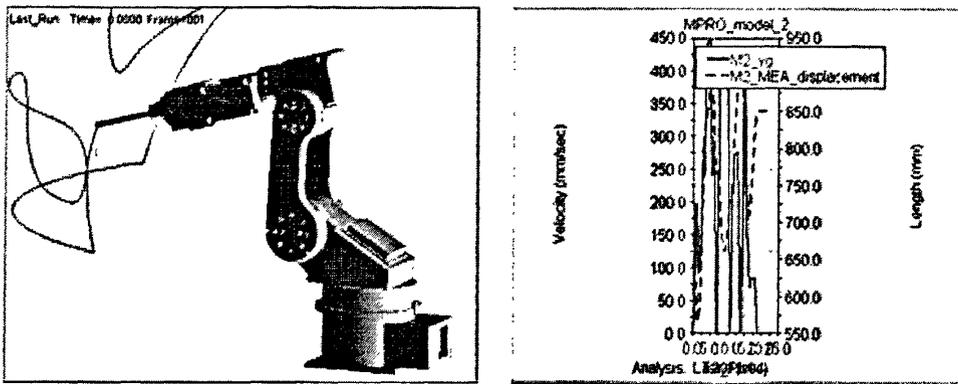


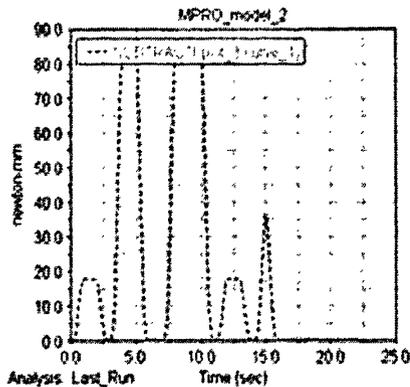
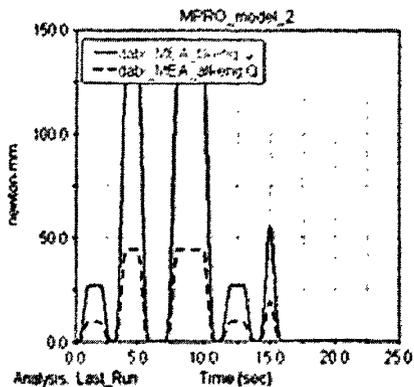
图 5-7 末端工具的速度和位移变化曲线的合成图

Fig.5-7 the composite image with velocity and displacement curve at end of the tool

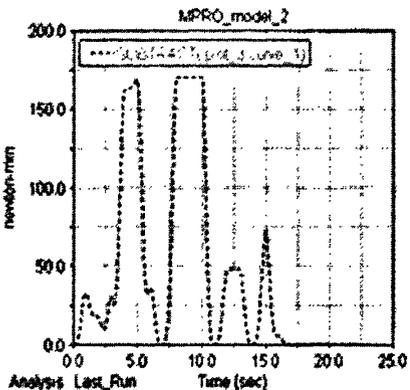
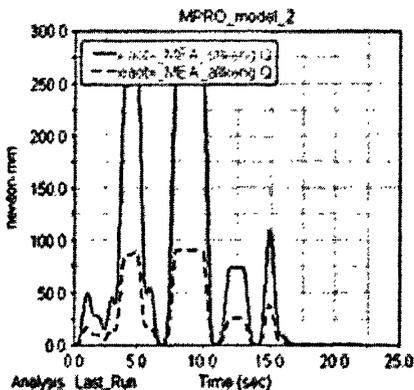
由图 5-7 可以看出, 在运动仿真中, 机器人末端的最大速度出现在 5 秒的时候为 444.822MM/S。相对全局坐标系的最大位移变化是 347.52MM, 末端速度变化由各个关节角速度共同决定, 运动仿真直观地表现了末端速度位移的变化情况。

⑤ 大小臂的动能计算

在仿真以后在大臂的材料为铝合金和钢材的属性下测量其动能。鼠标右击点大臂, 选择 measure, 在弹出的对话框中给测量数据重命名, 在 characteristic 中选择 Kinetic Energy 项, 然后点击 OK。用同样的步骤测量小臂在两种材料属性下的动能。如图 5-8 所示:



a 大臂在钢材和铝合金的属性下的动能



b 小臂在钢材和铝合金的属性下的动能

图 5-8 大小臂的动能

Fig.5-8 the kinetic energy of large and small arms

图中红色实线表示大小臂在钢材材料下的动能曲线，蓝色表示大小臂材料为铝合金材料下的动能，粉红色的虚线分别表示他们各自的差。由图中可知，在第 2.5s-5.5s，第 7s-10s 这两个时间段，动能变化就很明显，重量增加对其本身的动能影响很大。动能的测量对设计具有指导意义。从图中可知应尽量减机器人大小臂的重量，在增加机器人灵活性的同时还减小了驱动力矩，达到节约能耗的目的。

### 5.3.3 机器人逆运动仿真

机器人的逆运动学问题是已知末端工具的位姿来求解机器人各个关节旋转的角度，角速度。运动学逆问题求解较复杂，并且运动学逆解不是唯一的。同时运动学逆解又是机器人的轨迹规划和运动控制的基础。是运动学中必须研究的问题。在本节中，将在 ADAMS R3 中对焊接机器人做逆运动仿真。通过末端工具的运动，测得各关节的运动情况。

### 1) 仿真设置

在 ADAMS 中作一条封闭的曲线，拉伸得到一个薄板。薄板和大地 ground 固定连结。把焊接机器人末端工具通过凸轮副固定在薄板的便上，这样使机器人末端不至于偏离预定的封闭曲线。在焊接实际中，机器人焊枪是垂直于焊接区域的表面的，所以有必要对工具和薄板之间做一些约束，使工具末端垂直于薄板。这里采用垂直约束的方法：在末端工具中心上做一个 marker\_m1 点，设置它的 z 轴是沿着工具回转轴线的。然后设定 marker\_m1 点垂直于薄板里的两条相交直线，这样便设置了工具与封闭曲线垂直。因为在这个逆运动仿真中，各关节是没有驱动力的，所以要使各关节协调运动，则需要关闭仿真环境中的重力，这样使仿真结果更贴近实际。给 marker\_m1 点添加一个在平面的力 Sforce\_1。Sforce\_1 的方向需要经常调整，边尝试边调整。添加 Sforce\_1 的目的是使末端工具能在封闭曲线内完成一个运动。至此，逆运动仿真模型完成设置，如图 5-9 所示：

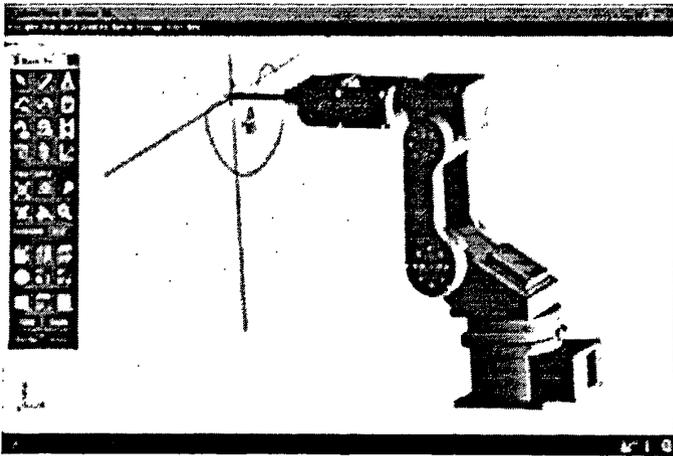
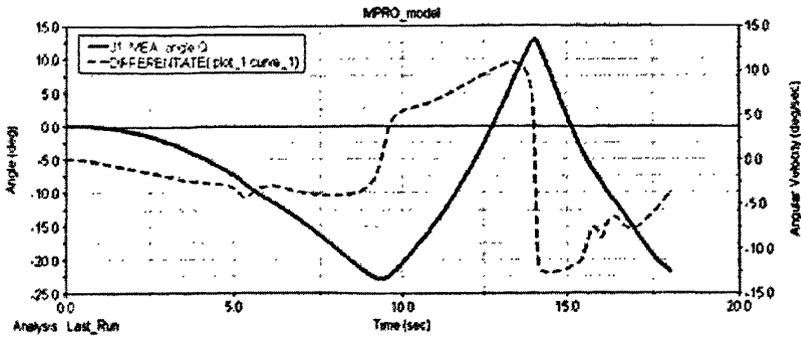


图 5-9 机器人逆运动仿真模型

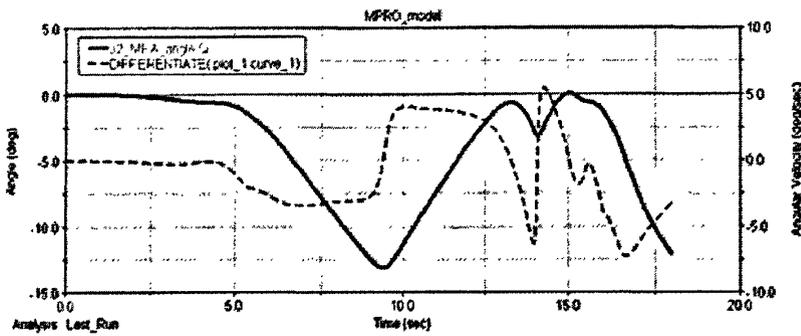
Fig.5-9 Simulation model of the robot inverse kinematics

### 2) 仿真计算和结果输出

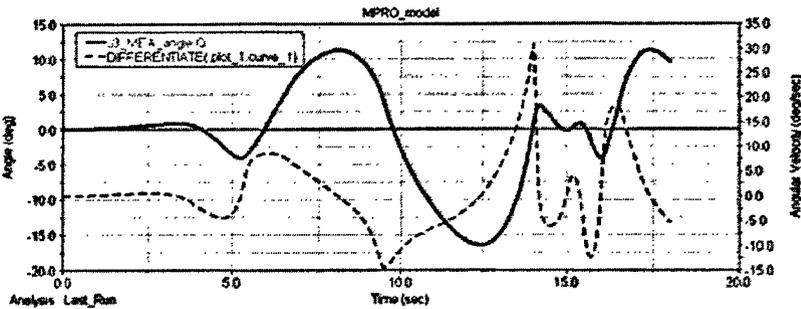
仿真时间设定为 18s。仿真步长为 500。进行仿真计算。测得各关节的角度变化。末端的位移变化，速度和角速度。如图 5-10 所示：



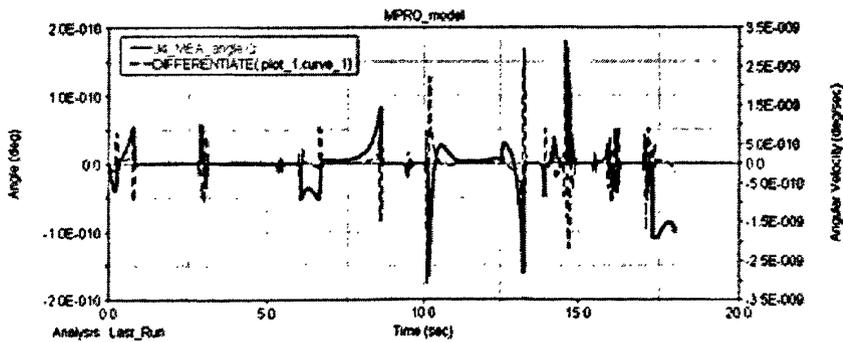
a 腰部关节的角位移和角速度



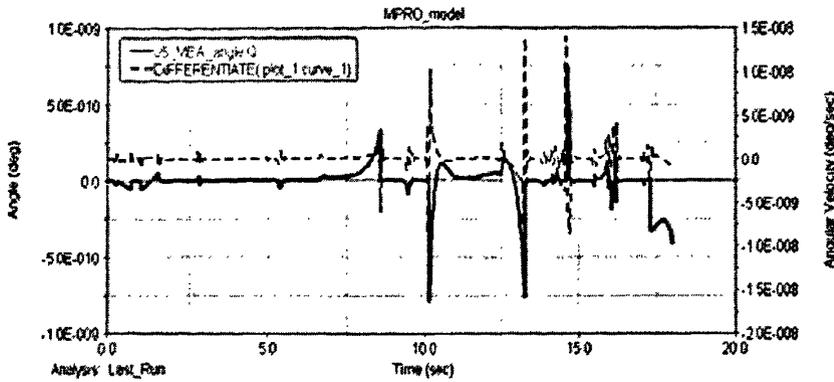
b 大臂关节的角位移和角速度



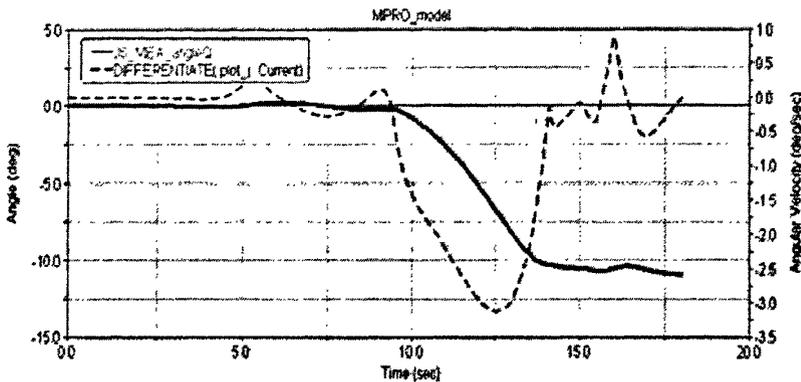
c 肘部关节的角位移和角速度



d 小臂关节的角位移和角速度



e 腕部关节的角位移和角速度



f 末端工具关节的角位移和角速度

图 5-10 各关节的角位移和角速度

Fig.5-10 The angular displacement and angular velocity of six joints

上图中，红色曲线表示角位移，蓝色曲线表示角速度。蓝色曲线时再后处理模块中，用红色曲线即角位移对时间求导得到的。在腰部关节中，最大的角位移是 $-22.6^\circ$ ，在第13-15s之间，角速度变化的比较大。大臂关节和肘部关节的速度在前第13s以前变化比较平缓。剧烈的变化出现在第13s以后。小臂关节和腕部关节在此次仿真中没有角速度，只有轻微的震动。末端工具关节有小范围的转动，角速度变化也平稳，由上图可知，m1点运动比较平稳。由于没有添加驱动，关节运动缺乏主动性，所以运动的情况是相对复杂的。把每个关节的角速度和移动速度都分解成x, y, z三个方向的分量，然后各自做成样条曲线，再添加到相应的关节中，用来驱动关节运动，这样可以实现机器人按照预定的末端轨迹运动。

## 5.4 本章小结

在本章中，对虚拟样子技术进行了介绍，同时还介绍了仿真软件 Adams，三维 CAD 软件 Pro/E 以及他们的数据传递情况。在 Pro/E4.0 中建立了焊接机器人的模型。利用 ADAMS R3 软件完成了焊接机器人的运动仿真，在正运动仿真中直观地观察到了焊接机器人的运动状态。测量到仿真运动中各关节的驱动力矩，角度变化，角速度和末端的运动轨迹。为机器人的设计和进一步优化设计提供了参考。在逆运动仿真中，由末端工具完成给定的轨迹行走，由此得出各关节的运动情况。为焊接机器人的轨迹规划和运动控制提供研究依据。基于 ADAMS R3 的运动仿真对进一步完善焊接机器人的设计有较大的帮助。

## 第六章 焊接机器人的有限元分析

### 6.1 引言

本课题设计的机器人用于完成精度要求较高的、有重复性的焊接工作。焊接工作要求机器人具有比较高的效率,另一方面又要保持较好的工作稳定性。焊接机器人的刚度就是在送丝机构等外围设备的重力以及工件的反作用力机器人末端克服变形能力的大小。产生变形的部位包括机座、腰部、大臂、肘部、小臂、腕部和末端等。焊接机器人各部件的形变直接影响机器人的强度和精度。因此在设计过程中,必须保证焊接机器人的刚度和强度要求,在结构设计出来后对其进行强度及刚度分析。在完成焊接工作中,机器人一直处在振动环境中,在不同的频率阶段以特有的形态进行着振动,这不仅降低了机器人的焊接精度,而且还缩短了焊接机器人的使用寿命。随着科学技术的发展,焊接产品的结构日趋复杂,为使焊接机器人能够安全可靠地工作,必须保证机器人良好的动态特性。因此,必须对焊接机器人进行动态分析、设计,以满足在工作中低振动、低噪声的要求。

机器人的设计、刚度,强度分析以及动态特性分析都需要大量而复杂的计算,用传统的计算分析方法实现起来难度很大,而且刚度和强度分析都是在物理样机出来以后进行的,这样势必导致分析的周期延长,同时造成了比较大的浪费。随着计算机应用技术和有限元分析技术的不断发展,应用现代的虚拟样机技术,对机器人刚度,强度和运动特性的分析变得容易很多了<sup>[69~71]</sup>。这种方法不但直观,而且大大地缩短了分析的周期。本文利用三维建模软件 Pro/E4.0 根据设计尺寸对焊接机器人进行三维建模,然后导入有限元分析软件 ANSYS10.0 中软件中,利用有限元方法结构强度和振动理论对焊接机器人进行多个工况下的受力分析,分析它的受力和变形情况。还进行模态分析确定了机器人的固有频率和相应频率的主振型。分析了机器人的薄弱部位,以此来提高机器人整体的动态性能。

## 6.2 有限元技术

### 6.2.1 有限元法

有限元法是一种近似方法。它是将连续的求解区域分散成许多按一定方式排列的单元的组合体。因为单元是按照特定方式组合的，且单元本身的形状结构比较简单，因此可以把形状复杂的求解域简化。

有限元法主要包括有限元位移法、有限元力法以及有限元混合法。有限元位移法的基本未知量是点的位移，有限元力法的基本未知量是点的力，有限元混合法的基本未知量包括点的位移和力。有限元位移法的计算很有系统性和规律性，很方便用编程来计算。所以有限元法中用得多的就是有限元位移法。有限元法的分析的精度决定于单元位移函数或位移模式。单元位移场越逼近真实模型的位移形态，则计算结果的精度。在力学有限元法中很难找到真实位移场，所以其有限元分析是模拟的近似解<sup>[72]</sup>。

计算机有限元分析方法是计算机应用技术和有限元方法的完美结合，其原理是把结构进行有限元离散化，用有限单元来表示复杂的机械结构，单元之间通过节点连接，然后根据有限元基本理论建立总体的平衡方程再求解。目前有影响力的有限元分析程序主要有 ANSYS, NASTRAN, ASKA, ADINA, SAP 等，其中 ANSYS 的用户占大多数。

### 6.2.2 ANSYS 有限元分析软件

#### 1) ANSYS 软件概述

ANSYS 是由美国 ANSYS 公司开发的大型通用有限元分析软件<sup>[73]</sup>。从诞生开始，ANSYS 公司不断的吸收最先进的计算方法和计算机技术、引领全球有限元分析软件的发展。ANSYS 软件凭借它的先进性，可靠性以及开放性等特点，被全球工业界广泛认可和接受，成为拥有最大的用户群有限元软件，ANSYS 软件在 1995 年通过 1509001 国际质量体系认证。

本文选择用 ANSYS10.0 作为工具对焊接机器人进行静力学分析和模态分析，分析焊接机器人进行多个工况下的受力和变形情况。模态分析确定了机器人的固有频率和相应频率的主振型。分析了机器人的薄弱部位，以此来提高机器人整体的动态性能。

#### 2) ANSYS 分析流程

ANSYS 分析过程包括 3 个三个主要步骤：1) 建立有限元模型；2) 施加载荷；3) 求解和结果后处理。具体的流程如图 6-1 所示：

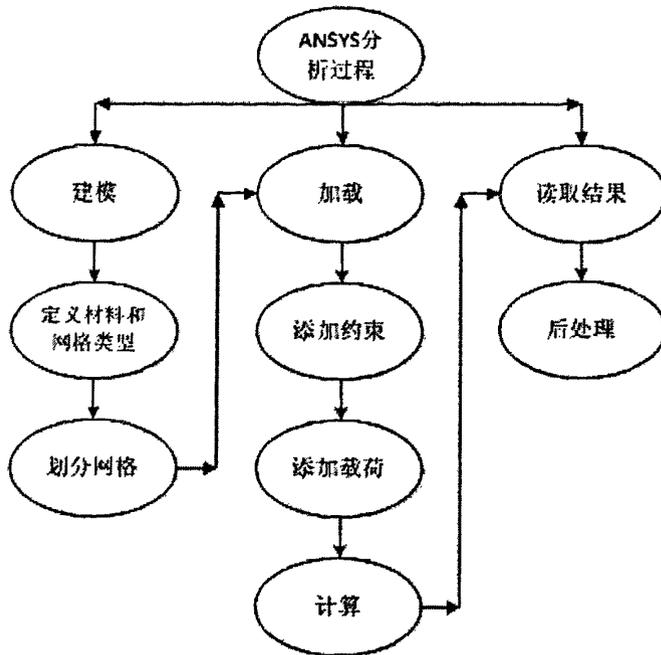


图 6-1 ANSYS 的分析过程

Fig.6-1 The analysis process of software ANSYS

### 6.3 机器人整机的多工况静力分析

#### 6.3.1 静力分析建模

焊接机器人有限元静力分析的第一步就是要创建有限元模型。创建有限元模型有两种方法，即直接创建法和导入法：直接法是直接在 ANSYS 软件中按照设计要求建立有限元模型。直接法建立模型，很方便对点，线，面进行编辑。但由于 ANSYS 软件对创建复杂的模型不方便。所以直接创建法适用于那些简单的机械结构。导入法是在其他的 CAD 软件中创建机械系统的模型，然后导入到 ANSYS 软件，这对创建复杂的模型是很有用的，不过用导入法产生的模型会出现数据丢失的现象，要经过反复的修改，简化才能达到理想的状态。焊接机器人关键部件包括底座，大臂，肘部，小臂和腕部。结构较为复杂。所以采用在 Pro/E 中建模，然后导入到 ANSYS 中，产生有限元模型。利用 ANSYS 软件进行分析时，必须对三维模型进行适当的简化，去掉倒角，螺钉孔和一些工艺结构。本文创建焊接机器人在三种工况下的有限元模型，第一种是大小臂水平伸展，第二种时大臂竖直，小臂水平，第三种是大小臂竖直伸展。生成的模型如下图所示：

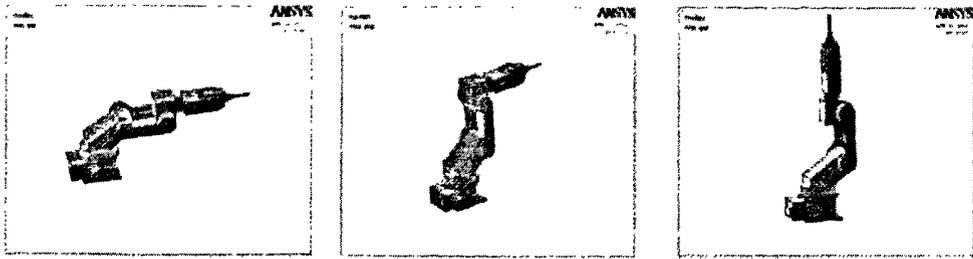


图 6-2 焊接机器人有限元模型

Fig.6-2 finite element model of welding robot

对于复杂机械系统的有限元分析，其模型创建是一个难点。因为不同软件之间的数据传递会出现数据丢失，导致特征生成失败。这时候针对提示到的错误，需要反复地修改导入模型，直至顺利地产生有限元模型。由于导入的焊接机器人三维模型在 ANSYS 里是一些离散的部件组合体。在对其做静力分析前需要把各部件连结起来，这里采用 ANSYS 模型创建功能里的布尔运算-粘接的方法连结好相邻的部件。有限元模型创建以后，接下来进行前处理阶段的一些设置。

1) 材料定义

前面一章已经提出，焊接机器人的机座，腰部，肘部，和工具是 45#钢材料，大臂，小臂和腕部在用 2024 铝合金。所以在定义材料的时候要定义两种材料，一边划分网格的时候选择相应的。定义材料的时候需要定义它们的弹性模量，泊松比和密度。在 Pro/e4.0 中建立的模型是以毫米为单位的，所以在定义材料属性的时候其单位需要统一好，否则计算后的结果单位不好确定，影响分析。在这里规定长度单位为 MM，质量单位为 KG，密度单位为 KG/MM<sup>3</sup>，力的单位为 N，加速度的单位为 N/KG，弹性模量为 MPa，应力单位为 MPa。由此得到各部件的材料属性如表 6-1 所示：

表 6-1 焊接机器人材料属性

Tab.6-1 The material properties of welding robot

机器人部件	密度 (KG/MM <sup>3</sup> )	弹性模量 (MPa)	泊松比
机座，腰部，肘部，末端工具	7.8E-6	2.07E5	0.29
大臂，小臂，腕部	2.7E-6	7.17E4	0.33

2) 网格划分

材料定义好以后，执行划分网格前得最后一步，确定单元类型。焊接机器人为三维模型，因此用三维实体单元才能更好地描述这些零件的真实状况。三维实体单元以它们的面数来分有两种：六面体单元和四面体单元。六面体单元要求实体模型结构比较规则而且简单，同时六面体单元网格的自动划分比较困难，因此选用八节点四面体三维实体

单元 (Solid45) 划分网格。划分网格的精度对求解精度相差不大, 所以网格划分的精度不要太高, 以降低了求解规模, 减少求解时间, 确定精度为 7 级, 并开启只能划分的功能。得到的网格模型如图 6-3 所示:



图 6-3 机器人网格模型

Fig.6-3 The grid model of robot

机器人网格模型总共包括 140811 个单元, 42403 个节点。

### 6.3.2 静力学加载

经过了材料定义, 网格划分。对模型进行添加约束和载荷。焊接机器人的机座通过地脚螺钉和工作台固定。在实际工作中, 机器人的肘部要安装送丝机构, 重量为 100N。末端要安装焊枪, 重量为 50N。所以给机器人的机座的四个螺钉孔添加全约束, 肘部添加 100N 的力, 分在四个节点上, 方向为 -Y 方向, 在末端添加 50N 的力, 分在两个节点上, 方向为 -Y 方向。添加重力加速度: 9.8N/KG。由于 ANSYS 软件的规定是添加在机械结构高度方向的坐标轴的正方向, 所以加速度的方向取 +Y 方向。至此, 完成模型的加载。

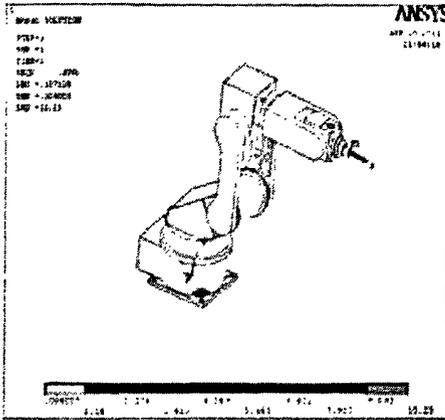
### 6.3.3 求解和后处理

加载完成以后, 进行静力计算, 在 ANSYS10.0 的主菜单里选择 Solution-Solve-Current LS。进行静力分析的计算。在这个过程需要 2-3 分钟, 最后点确定完成计算。在后处理阶段主要是查看静力分析的结果, 可以得到三种工况下焊接机器人的应力云图、变形云图等。在主菜单中选择 General Postproc-Plot Results, 然后选择需要的结果。在本文中只有 Y 方向受到力, 所以主要查看了 Y 方向的变形和应力以及综合的变形和应力图。焊接机器人三个工况下的应力云图和变形云图如图 6-4 所示:

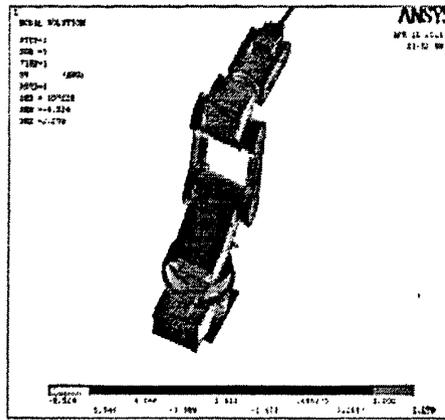


分,腰部和机座变形特别轻微。机器人所受最大应力远远小于材料的强度期限 350 MPa,是安全的。变形在允许的范围±0.5MM 之内,对焊接精度影响不大。

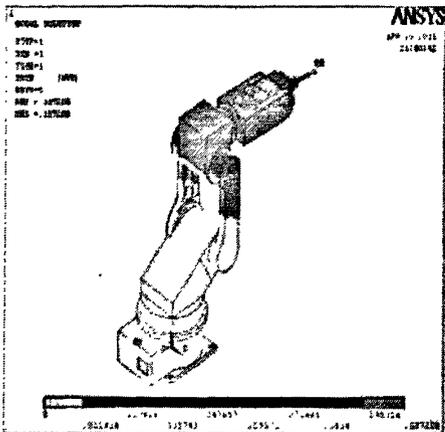
2) 机器人在第二种工况的结果云图:



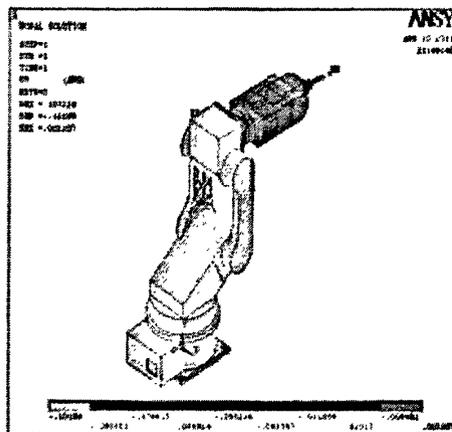
a 机器人综合应力云图



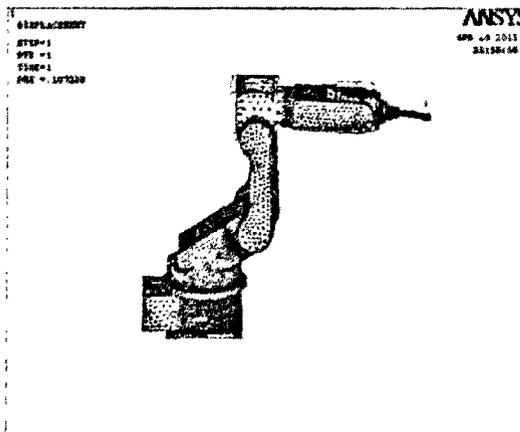
b 机器人在 y 方向的应力云图



c 机器人综合变形云图



d 机器人在 y 方向的变形云图



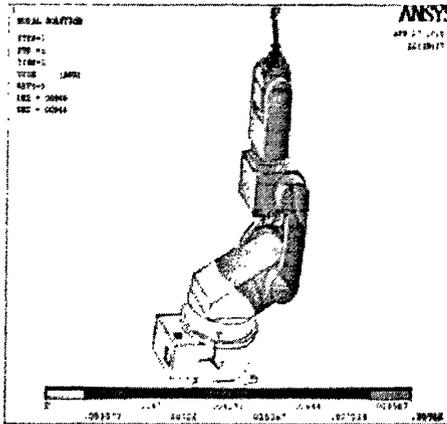
e 机器人变形前后的对照

图 6-5 机器人在工况二的结果云图

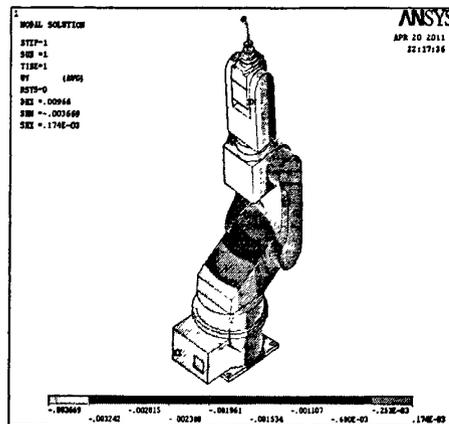
Fig.6-5 The cloud picture of result robot in working condition II

由图 6-5 显示，焊接机器人在工况二所受到的最大应力是 10.23MPa，最小应力是 0.004MPa。最大应力还是出现在末端和腕部的连结处，机座底板和旋转体的连结处以及腰部的中间部分最大受到 4.549MPa 的应力。最大变形还是工具的末端，为 0.101MM。机器人所受最大应力远远小于材料的强度期限 350 MPa，是安全的。变形在允许范围 ±0.5MM 之内。

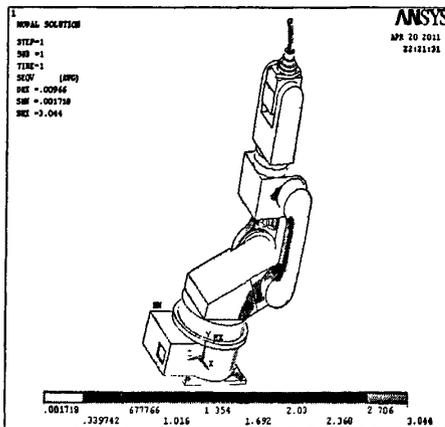
3) 机器人在第三种工况下的结果云图：



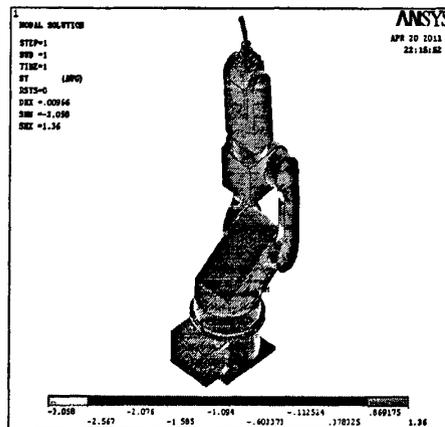
a 机器人综合应力云图



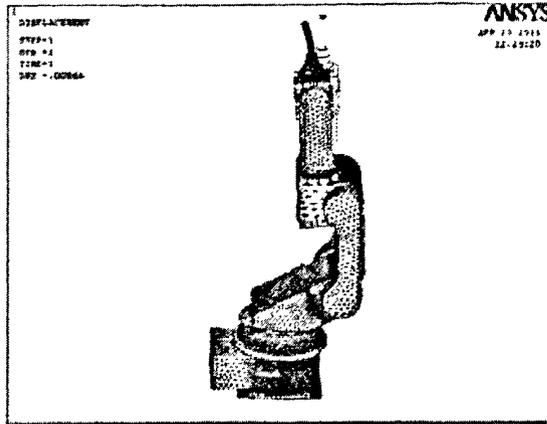
b 机器人在 y 方向的应力云图



c 机器人综合变形云图



d 机器人在 y 方向的变形云图



e 机器人变形前后的对照

图 6-6 机器人在工况三的结果云图

Fig.6-6 The cloud picture of result robot in working condition III

由图 6-6 中可知，焊接机器人在工况三所受到的最大应力是 3.004MPa，最小应力是  $1.7 \times 10^{-3}$ MPa。最大应力是出现机座上的四个地脚螺钉处。其他部位包括大臂，腰部，肘部的两侧以及工具受力较大。最大变形出现在工具顶端部分，为 0.0086MM。整机所受最大应力远远小于材料的强度极限 350 MPa，是安全的。变形很小，远小于允许的精度  $\pm 0.5$ MM，可忽略不计。

## 6.4 机器人整机有限元模态分析

焊接机器人的动态性能直接影响焊接工作的效率、稳定性和可靠性。在本章将对六自由度焊接机器人整机进行有限元模态分析，得出焊接机器人的固有频率和主振型，为机器人的结构改进提供理论基础。

### 6.4.1 模态分析理论

模态分析属于动态分析，是用来确定结构的振动特性的一种技术：包括确定固有频率、振型以及振型参与系数。对于一个具有  $n$  个自由度的线性体系，其动力方程可表示为<sup>[74-76]</sup>：

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F(t)\} \quad (6-1)$$

式中， $[M]$ —质量矩阵； $[C]$ —阻尼矩阵； $[K]$ —刚度矩阵； $\{\ddot{u}\}$ —加速度向量； $\{\dot{u}\}$ —速度向量； $\{u\}$ —位移向量； $\{F(t)\}$ —动载荷向量； $t$ —时间。

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & \dots & m_{1j} & \dots & m_{1n} \\ m_{21} & m_{22} & \dots & m_{2j} & \dots & m_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ m_{j1} & m_{j2} & \dots & m_{jj} & \dots & m_{jn} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ m_{n1} & m_{n2} & \dots & m_{nj} & \dots & m_{nn} \end{bmatrix} \quad K = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \dots & k_{1j} & \dots & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & \dots & k_{2j} & \dots & k_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ k_{j1} & k_{j2} & \dots & k_{jj} & \dots & k_{jn} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ k_{n1} & k_{n2} & \dots & k_{nj} & \dots & k_{nn} \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1j} & \dots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2j} & \dots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ c_{j1} & c_{j2} & \dots & c_{jj} & \dots & c_{jn} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \dots & c_{nj} & \dots & c_{nn} \end{bmatrix}$$

在对机械结构进行模态分析时，我们忽略其阻尼系数，即  $[c] = 0$ 。假定各质点按同一频率做简谐运动，则可得方程：

$$\{u(t)\} = \{U\} \sin(\omega t + \theta) \tag{6-2}$$

式中  $\{U\}$  为幅值向量， $\omega$  为圆频率， $\theta$  为初相角。把 (6-2) 式代入 (6-1)，式中  $[c] = 0$  由系数行列式为 0 可得

$$[[K] - \omega^2 [M]] = 0 \tag{6-3}$$

可得方程：

$$\omega^{2n} + \alpha_1 \omega^{2(n-1)} + \dots + \alpha_{n-1} \omega^2 + \alpha_n = 0 \tag{6-4}$$

由此解出 N 阶频率  $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ ，代入 (6-1) 可得振型向量： $\{U^1\}, \{U^2\}, \dots, \{U^n\}$

ANSYS 提供了七种模态提取方法：

- 1) Subspace 方法，该方法采用子空间迭代技术，特别用于大型对称特征值问题。
- 2) Block Lanczos 方法，此方法功能强大，提取中、大型模型的大量振型 ( $> 40$ )。把这种方法应用于子空间方法适用的方法，可以获得更快的收敛速度。
- 3) Power Dynamics 方法，适用于求解大型模型的较少振型，速度快。
- 4) Reduced 方法，该方法适用于集中质量不会引起局部振动的模型的模态分析。
- 5) Unsymmetric 方法，适用于声学等具有不对称质量矩阵和刚度矩阵的问题分析。
- 6) Damped 方法，应用于不能忽视阻尼的机械系统的模态分析。
- 7) QR Damped 方法，它可以很好地求解大阻尼系统的模态，适用于不同的阻尼类型。

本文采用 Block Lanczos 法进行模态分析。Block Lanczos 法是模态分析常用的方法。也是 ANSYS 软件模态分析默认的方法。Block Lanczos 法经常应用在具有实体单元或壳单元模型中，能很好地处理刚体振型。该方法需要较高的内存。

## 6.4.2 建模与加载

前面章节已经建立了焊接机器人的三维模型,考虑到模态分析要测量焊接机器人整机的固有频率,单位为 Hz。所以在模态分析的时候先把模型的尺寸都转化为国际制单位。在 Pro/E4.0 中把单位转化以后,一些小尺寸的结构还需要进行修理。否则造成关键点被 ANSYS 忽略而无法生成体,导致有限元模型生成失败。各部件的材料已由前面章节给出。在模态分析中,给焊接机器人的机座添加约束,设置重力加速度为 9.8N/KG,而不添加其他载荷。

## 6.4.3 模态计算结果输出

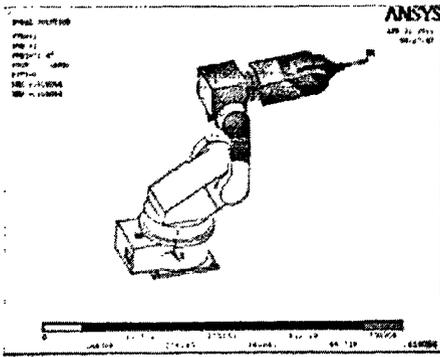
采用模态分析里的 Block lanczos 法求解焊接机器人模型的前 10 阶模态频率及主振型,并提取前 10 阶模态。经过计算分析出焊接机器人模型的前十阶固有频率,如下图所示:

SET	TIME/PREQ	LOAD STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	96.949	1	1	1
2	116.45	1	2	2
3	241.94	1	3	3
4	263.15	1	4	4
5	550.30	1	5	5
6	747.31	1	6	6
7	895.52	1	7	7
8	1005.9	1	8	8
9	1112.9	1	9	9
10	1199.7	1	10	10

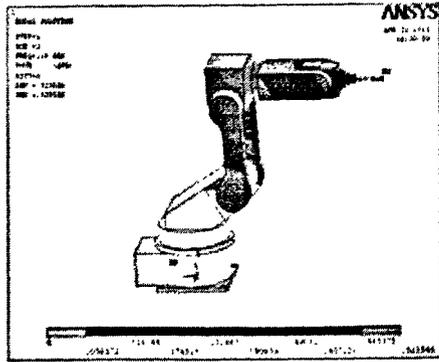
图 6-7 焊接机器人前十阶固有频率 (单位: Hz)

Fig.6-7 First ten step natural frequencies of vibration mode of welding robot(unit: Hz)

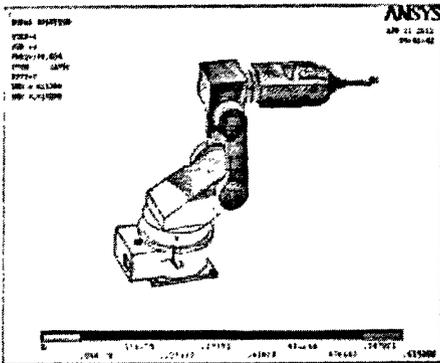
限于篇幅，本文只给出了前 6 阶的模式振型图，如下图所示：



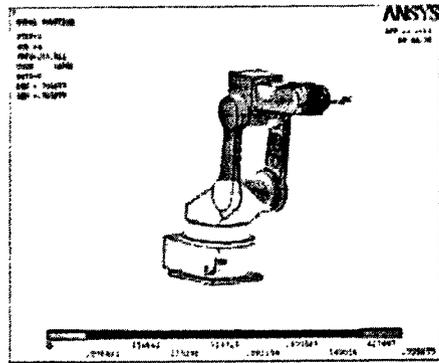
a 焊接机器人一阶振型



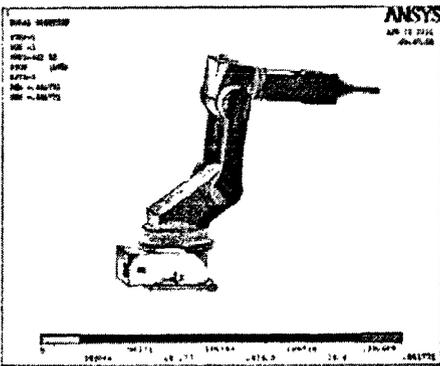
b 焊接机器人二阶振型



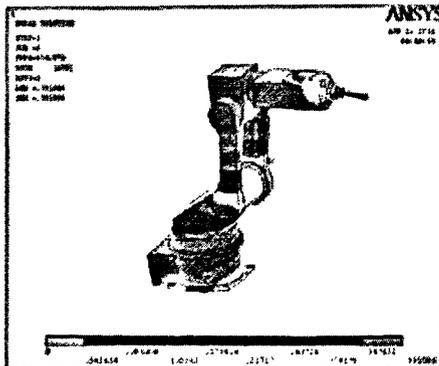
c 焊接机器人三阶振型



d 焊接机器人四阶振型



e 焊接机器人五阶振型



f 焊接机器人六阶振型

图 6-8 焊接机器人前六阶振型

Fig.6-8 The first six modes of vibration of welding robot

焊接机器人前六阶固有频率和对应的振型分析，如下表所示：

6-2 机器人前六阶频率和振型

Tab.6-2 The first six order frequencies and modes of robot

阶数	固有频率 (Hz)	主振型
1	96.949	大臂、肘部、小臂和腕部整体绕着大臂的旋转轴作翻滚运动
2	116.45	小臂绕着 Y 轴在 X-Z 面内左右偏摆运动
3	241.94	大臂绕着 Y 轴扭动
4	263.15	小臂在 Y-Z 平面内做上下摆动
5	550.30	大臂沿着 Y 轴做扩张和收缩运动
6	747.31	腰部绕着 Z 轴左右回转

焊接机器人的第一阶固有频率为 96.949Hz，第十阶固有频率为 1199.7Hz。所以机器人在执行焊接任务时，工作频率应避开上述的机器人的固有频率。从模态分析结果显示的各阶振型中可以看出，小臂的左右偏动和大臂的扭动振动幅值很大，而大小臂的振动对焊接精度有极大的影响。所以在日常工作中尽量避免这些频率段。加强大臂的刚度和小臂与肘部的连结刚度，从而抑制这些振动。

## 6.5 本章小结

本文采用有限元法，根据焊接机器人的设计要求，在 CAD 三维软件 Pro/E4.0 中建立机器人的三维模型，经过必要的简化处理导入到 ANSYS10.0 中粘接各部件，按要求定义材料类型，选择了合适的单元类型，完成网格划分，建立有限元模型。对焊接机器人的三种工况进行静力分析。分别获得焊接机器人的最大应力和最大变形，直观显示了焊接机器人的应力分布和位移分布。静力分析结果表明，焊接机器人在三种工况下的最大应力都远远小于各材料的强度极限，强度能满足工作要求。变形较小，能保证机器人在焊接工作中保持足够的精度。然后对机器人进行了动力学模态分析，获得了机器人的前十阶固有频率，分析其主振型，为动力学优化提供了依据。

## 第七章 总结和展望

### 7.1 总结

本论文是在研究了国内外有关工业机器人尤其是焊接机器人本体的研究现状和发展方向的基础上,参考国内外先进的工业机器人本体结构,根据本课题的研究目标,和单件生产的现实条件。设计了一种焊接机器人方案,确定部件加工,并对焊接机器人进行了运动学分析、仿真以及有限元分析。在第二章中,对焊接机器人总体方案布局和结构设计。在第三章中,讨论了在单件生产条件下的机器人部件加工方法,并以此对各部件进行结构设计,确定加工方式。在第四章中,对焊接机器人进行运动学建模并进行了正、逆运动学求解。在第五章中,运用优秀的运动学分析软件 ADAMS R3 进行了焊接机器人的运动学仿真。第六章中,对焊接机器人整机做了有限元静力和模态分析,为焊接机器人本体的优化提供有参考价值的数据。本文的研究工作归纳如下:

- 1、深入分析焊接机器人的工作特点和要求,在参考现有工业机器人的基础上,对焊接机器人的进行了整体方案设计,确定了焊接机器人本体结构布局和驱动传动系统。

- 2、通过对比单机生产时,铸造加工和焊接加工成本与时效分析,提出了采用焊接的方式来加工关键而复杂的部件,代替制造成本高,周期长的铸造加工。确定了拆分复杂部件、拼焊简单易加工的小零件的设计原则与方法,并应用到本体的关键部件的设计与制造,这是本论文研究最重要的特色。

- 3、运用 D-H 法对焊接机器人建立运动学模型,进行了运动学分析并解出运动学方程的正、逆解。

- 4、运用 Pro/E 和 ADAMS 的接口软件 MECHANISM/Pro 将在 Pro/E4.0 中建立的实体模型输入到 ADAMS R3 中,通过施加约束、驱动,在 ADAMS R3 中对机器人仿真模型进行运动学和动力学仿真和分析。为机器人在焊接过程中的参数的选择和物理样机的制作提供了有参考价值的数据。

- 5、利用在 Pro/E 中建立的焊接机器人三维模型,导入有限元分析软件 ANSYS10.0 中进行静力学特性分析,分析了焊接机器人整机应力分布和形变情况。对焊接机器人模型进行模态分析,研究了其动态响应规律和特性。为后续的结构优化提供依据。

## 7.2 展望

本论文完成了焊接机器人本体的设计,进行了运动学分析。用 ADAMS R3 中对焊接机器人进行了运动学仿真。运用有限元分析软件对所设计的焊机器人进行静力和模态分析。为焊接机器人的优化和样机的制作奠定了基础。同时,焊接机器人是机电一体化产品,开发的难度是比较大的,本文只完成了机器人本体初步的方案和零部件的设计、运动学分析和仿真、有限元静力和模态分析。还有完善优化工作需要后续完成。

(1) 本文对焊接机器人的运动学分析中,运动方程的验证只选取了一组特殊点。如果要得到完善的运动学验证,需要选取更多的点。在运动学仿真一章中,对于逆运动学仿真完成的不够全面,由于各关节的驱动电机处于未工作的状态和缺乏主动适应性的能力,造成逆运动学仿真中出现奇异点。结合其他的分析方法比如 MATLAB 协调分析将得到更为合理的分析结果。

(2) 本文在对焊接机器人有限元分析时所建立的模型不是应用参数化建模,这样不好在 ANSYS 软件中进行自动寻优的计算。在 ANSYS 中对机器人本体进行参数化建模,那样更加有利于对各部件的跟踪优化,从而更有针对性的完成各部件结构形状和重量等参数的优化设计。在焊接机器人的机械本体制造出来后,可通过物理实验对有限元分析结果进行验证。

## 参考文献

- [1] 毛鹏军, 黄石生, 李阳等. 焊接机器人技术发展的回顾与展望[J]. 焊接, 2001(8): 6-10
- [2] 谭一炯, 周方明, 王江超等. 焊接机器人技术现状与发展趋势[C]. 电焊机, 2006, 36(3): 6-10
- [3] 余达太, 工业机器人应用工程[M]. 北京:机械工业出版社, 1999
- [4] Lucas W. Experience in developing expert system and neural for arc[J]. Welding in the world, 1994(34):234-245
- [5] 赵臣, 王刚. 我国工业机器人产业[J]. 机器人技术与应用, 2009 (2) , 8-13
- [6] Y Suga, M Narus, T Tkiwa. Application of neural network to visual sensing of welding and automatic tracking in robot welding in the world, 1994, 34: 225282
- [7] L. Zhou, T. Lin. Autonomous Acquisition of Seam Coordinates for Arc Welding Robot Based on Visual Serboing[J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2006, 47(3): 239-255
- [8] Sheng — FenHsieh. Re — Configurable Dual — Robot Assembly System Design, Development and Future Directions. Industrial Robot, Vo30No3. 2003
- [9] 王田苗. 全力推进我国机器人技术[J]. 机器人技术与应用, 2007(2): 17-23
- [10] 徐方. 工业机器人产业现状与发展[J]. 机器人技术与应用, 2007(5): 20-24
- [11] 世界机器人最新统计数据[J]. 机器人技术与应用, 2000(6): 10-12
- [12] 本刊记者. 工业机器人发展现状浅谈[J]. 自动化博览, 2007 (4) : 54-55
- [13] 魏娜然, 刘明亮, 唐文庆. 我国焊接技术的发展现状及趋势[A]. 科技创新导报. 2009
- [14] 王其芳. CAD 三维技术在机械设计中的应用[J]. 煤炭机械. 2007: 85-87
- [15] 雷新宇, 董臻. CAD 技术与应用[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1997
- [16] 崔东. M\_6iB 型 FANUC 机器人的三维运动仿真及有限元分析[D]. 西安, 西安理工大学, 2007, 28(2): 37-39
- [17] 荣学文, 吴利宁, 李云江, 樊炳辉. 基于 ADAMS 的机器人三维实体动画仿真[J]. 煤矿机械, 2004
- [18] 万海波. 五自由度机械手运动性能及动力学分析与仿真[D]. 河北, 河北工业大学, 2007
- [19] 张旭, 毛恩荣. 机械系统虚拟样机技术的研究与开发[J]. 武汉: 中国农业大学学报, 1999(3): 94-98

- [20] Eppinger S.D., Seering W.P. Introduction to Dynamic Models for Robot Force Control. IEEE control Systems, 1987: 48-52
- [21] 谷雨明. 物料搬运机械手的系统分析与仿真[D]. 沈阳, 东北大学, 2006
- [22] 刘义翔, 李瑞峰, 李东婉. 应用软件 ADAMS 对点焊机器人手臂机构进行动力学仿真研究[J]. 哈尔滨商业大学学报, 2001(3): 63-66
- [23] 谷鸣宇. 六自由度机械手运动学、动力学分析及计算机仿真[D]. 长春, 吉林大学, 2004
- [24] 勾治践, 孙影, 徐连香等. 六自由度点焊机器人运动学仿真[J]. 电气与自动化. 2009, 38(2): 155~156, 164
- [25] 沈红芳, 郑建荣. 弧焊机器人虚拟样机研究[J]. 上海: 上海电机技术高等专科学校学报. 2002(2): 1~4
- [26] 夏发平. 工业机器人运动学建模与仿真研究[D]. 武汉, 华中科技大学, 2007
- [27] Sheng Lin. Robust and intelligent control of mobile manipulators:[Dissertation]. Toronto: Graduate Department of Mechanical and Industrial Engineering University of Toronto, 2001
- [28] 吴小峰, 林业修剪机器人运动学\_动力学仿真[D]. 南京, 南京林业大学, 2007
- [29] 孙克新, 空间机器人动力学分析与控制仿真[D]. 哈尔滨, 哈尔滨工业大学, 2006
- [30] 欧阳兴, 仿人机器人有限元分析研究[D]. 北京, 清华大学, 2003
- [31] 蓝宇, 张连杰. 大型有限元分析软件 ANSYS[J]. 应用科技. 2000 (6): 11-15
- [32] 李伟光, 刘建华. 基于 ANSYS 的工业机器人小臂有限元静态分析[J]. 设计与研究. 2010(5): 61-63
- [33] 郭海鹰. 大型通用有限元分析软件 ANSYS 简介及应用体会[J]. 无线电通讯技术. 1996(5): 51-55
- [34] 美国 ANSYS 公司北京办事处. ANSYS 入门手册 上下. 1998
- [35] 美国 ANSYS 公司北京办事处. ANSYS 动力学分析指南. 1998
- [36] 王国强. 实用工程数值模拟技术及其在 ANSYS 上的实践[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2001
- [37] 龙立新. 工业机械手的设计分析[J]. 焊工之友, 1999(3): 47-48
- [38] 殷际英, 何广平. 关节型机器人[M]. 北京:化学工业出版社, 2007
- [39] 熊有伦. 机器人技术基础[M], 武汉: 华中科技大学出版社, 2007
- [40] 李志辉. 6R 型喷漆机器人运动学分析与本体结构设计[D]. 南宁: 广西大学. 2010

- [41] 孙树栋. 工业机器人技术基础[M], 西安: 西北工业大学出版社, 2006
- [42] 孙杏初. 关节型机器人主连杆(手臂)参数的优化设计[J], 北京航空航天大学学报, 1996(4): 509-512
- [43] 曾剑. 六自由度关节型喷漆机器人结构静态误差分析与本体结构设计[D]. 南宁: 广西大学, 2010
- [44] 王刚. 焊接生产中控制焊接应力及变形的措施. 四机科技, 2007(26): 26-29
- [45] 王咏梅, 康显丽, 张瑞萍. Pro/ENGINEER Wildfire 4.0 中文版机械设计案例教程 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2009
- [46] 侯国柱. 关节型机器人的结构设计及其运动学分析[D]. 内蒙古: 内蒙古工业大学, 2007
- [47] Kesheng W, Terje K Lien. The Structure Design and Kinematics of a Robot Manipulator-I. Theory, Robotics & Computer Integrated Manufacturing, 1989, 5(2/3): 153~158
- [48] 杨达毅. 6R型工业机器人的运动学研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2005
- [49] 肖英. 机器人操作器总体设计中的两个问题——机型选择和结构参数确定[J]. 机器人, 1990, 12(3): 48-51
- [50] Paul R P. Robot Manipulator: Mathematics, Programming and Control[M]. Cambridge: MIT Press, 1981.181-187
- [51] 吴小峰. 林业修剪机器人运动学、动力学仿真[D]. 南京: 南京林业大学, 2007
- [52] 陈平. MOTOMAN\_UPJ型机器人运动学研究[D]. 镇江, 江苏大学, 2007
- [53] 陶其铭. 机器人轨迹规划的研究[D]. 合肥, 合肥工业大学, 2003
- [54] 李小唐. 六自由度串联机械手位置逆解若干问题的研究[D]. 北京, 北京邮电大学, 2003
- [55] Park, Joong-Jo. Development of the 6-axis force-moment sensor for an intelligent robot's gripper[J]. Sensors & Actuators A: Physical, 2005, 118(1): 127-134
- [56] Dinesh Manocha, John F Canny. Efficient inverse kinematics for general 6R manipulators[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1994, 10(5): 648-657
- [57] 杨达毅. 6R型工业机器人的运动学研究[D]. 长春, 吉林大学, 2005
- [58] 田忠强. 一种五自由度机器人机构的研究与开发及运动学分析[D]. 西安, 西安理工大学, 2004
- [59] 陈平. MOTOMAN\_UPJ型机器人运动学研究[D]. 镇江, 江苏大学, 2006
- [60] 张铁, 谢存禧. 机器人学[M], 广州: 华南理工大学出版社, 2001

- [61] 孟繁华. 机器人应用技术[M], 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 1989
- [62] Kesheng W, Lien T K. Closed form Solution for the Inverse Kinematics of a Puma Robot Manipulator-II. Demonstration, Robotics&Computer Integrated Manufacturing, 1989,5(2/3): 159-163
- [63] Kesheng W, Terje K Lien. The structure design and kinematics of a robot manipulator. Theory, Robotics&Computer Integrated Manufacturing. 1989.5
- [64] Manocha D, Canny J F. Real time inverse kinematics for general 6R manipulators [C]. Proceedings of the International Conferences on Robotics and Automation. Nice, France, 1992:383-389
- [65] 王战中, 张大卫, 安艳松等. 非球型手腕 6R 串联型喷涂机器人逆运动学分析[J]. 天津大学学报, 2007(6): 665-670
- [66] 谷鸣宇. 六自由度机械手运动学、动力学分析及计算机仿真[D]. 长春, 吉林大学. 2005
- [67] 余锋. 基于虚拟样机技术的专用机器人动力学研究[D]. 兰州, 兰州理工大学. 2003
- [68] MECHANISM/Pro Reference Manual. MSC.Software, 1999
- [69] 杨国良. 工业机器人动力学仿真及有限元分析[D]. 武汉, 华中科技大学. 2007
- [70] Daejong Kim. Parametric studies on static and dynamic performance of air foil bearings with different top foil geometries and bump stiffness distributions[J]. Tribology, 2007, 129(2):354-364
- [71] Saeed Monaveni. Finite Element Analysis Theory and Application with ANSYS. Beijing:Publishing House of Electronics Industry: 2003
- [72] 王勖成, 邵敏. 有限单元法的基本原理和数值方法[M]. 北京:清华大学出版社, 1997
- [73] 龚曙光. ANSYS 工程应用实例解析[M]. 北京:机械工业出版社, 2003
- [74] 张朝晖. ANSYS 10.0 结构分析工程应用实例解析[M]. 北京:机械工业出版社, 2008
- [75] Xiaoping Liao, Changliang Gong, Yizhonglin etc. The finite element modal analysis of the base of welding robot. The 3rd International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering. Chengdu, china. 2010, 2 (3): 123-126
- [76] 钮冬至, 樊启泰. 用 ANSYS 软件研究轴流通风机叶轮的振动特性[J]. 计算机应用. 2001(5): 29~30

## 致谢

在本论文即将完成之际，谨此向我的导师廖小平教授致以衷心的感谢和崇高的敬意！本论文是在廖老师的悉心指导和热情关怀下完成的。廖老师渊博的知识、一丝不苟的治学态度、严谨求实的治学风范以及诲人不倦的精神使我深受鼓舞并受益终生。三年来，廖老师在我的学习、课题研究以及生活上给予了精心的指导和无微不至的关怀，我的每一点进步都凝聚着老师的心血。我一定谨记师恩，继续努力！

其次，我要感谢林义忠教授。在课题研究以及论文的撰写过程中，林义忠教授给予了细心的指导和大力支持，提出了许多宝贵意见和建议，使我受益匪浅。在此表示衷心的感谢。同时感谢夏薇教授、曾盛绰教授、陆静平副教授、马俊燕老师，这篇论文能够顺利完成，离不开他们多年来一贯的支持、关心和帮助。

感谢闫雪莲、汪伟东、赵红飞、韦仁、黄月芹、陈丽莉、杨孝平、彭微、苏飞、李勤等同学和李志辉、曾剑、吉惠丹、胡查辉、戴姣丽等上一届师兄师姐给予的关心与帮助。感谢李柳林、阮婷、韦永福、蒋达等师弟师妹在学习生活中的帮助和关心！

感谢我的父母、亲人、朋友。感谢他们对我坚定不移的支持，感谢他们给与我战胜一切困难的勇气和自信；感谢所有关心、指导、帮助和批评过我的人。

最后，感谢从百忙之中抽出时间评阅论文和参加答辩的各位专家、教授！

## 攻读学位期间发表的学术论文

- [1] 廖小平, 龚常亮, 林义忠, 汪伟东. 《The finite element modal analysis of the base of welding robot》 [C]. 2010 年第三届计算机理论和工程国际会议(ICACTE2010), 中国成都, 2010: v2, 123-126
- [2] 廖小平, 汪伟东, 林义忠, 龚常亮. 《Time-optimal trajectory planning for a 6R jointed welding robot using adaptive genetic algorithms》 [C]. 2010 年 IEEE 国际计算机、机电、控制和电子工程会议(CMCE2010). 中国长春, 2010: v2, 600-603

# 六自由度焊接机器人本体设计制造以及性能分析

作者：龚常亮  
学位授予单位：广西大学



本文链接：[http://d.g.wanfangdata.com.cn/Thesis\\_Y1953093.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Thesis_Y1953093.aspx)