

# 工业机器人路径规划及 轨迹优化研究

The Path Planning and Trajectory Optima  
of the Industrial Robots

勾治践 著



 吉林大学出版社

## 专题一

# 基于 ADAMS 的机器人运动学及 动力学仿真分析



随着我国工业化的不断发展和对自动化水平要求的不断提高,焊接机器人尤其是点焊机器人的需求量快速增长,提高焊接机器人焊点位置精确度和焊件质量就成为工程界关心的热点。焊接机器人的运动方程建立和运动学方程的求解已成为焊接机器人技术的关键之一,一直受到学术界的广泛关注。

作者以 IRB1400 型六自由度工业机械人点焊为研究对象,采用 D-H 法建立了其运动学方程,推算了运动学正解,并根据已知机器人的各杆关节变量求出末端执行器的位姿。正解相对简单,且解唯一。运动学逆解是根据已知机器人末端执行器的位姿求机器人各杆的关节变量,逆解计算较复杂且有多组解,但逆解是机器人空间运动规划和轨迹控制的基础,对提高焊接机器人焊点位置精度,提高焊件质量至关重要。逆解求解一般采用传统算法即代数法,该法计算量比较大。作者拟定机器人空间点焊过程中的两点,采用画法几何法实现了逆解的求解。利用画法几何正投影原理,把操作机的位姿解的空间问题转化为平面几何问题来处理。该方法简单明了、计算量小、多解直观,且投影法图解结合各个关节角度范围及实际的工作环境可以避免优解选择的繁琐性及不必要的逆解计算。根据几何投影法图解推算出逆解公式后,通过代入该机器人的极限位置点验证了该几何法求解的正确性。

其次,本文利用三维设计软件 CATIA 按照机器人的主要结构尺寸建立该机器人各个零部件的几何模型,并进行装配,添加约束。借助 ADAMS 的一个插件 Simdesinger 将模型以 cmd 文件形式导入到 ADAMS 中。最后,通过 ADAMS 的计算机仿真,在 ADAMS/Postprocessor 模块中输出了关节 E 点由  $P_2$  运动到  $P_1$  时  $x$ ,  $y$ ,  $z$  轴位置变化曲线和各个关节角度变化曲线,从仿真曲线上分析验证该几何模型及几何法求逆解的正确性,在与传统法和迭代法比较的基础上,证明了几何法求逆解简单明了,多解直观,且投影法图解结合各个关节角度范围及实际的工作环境可以避免优解选择的繁琐性及不必要的逆解计算,节省大量计算时间,提高工作效率,且此逆解计算具有很强的实用性,对于任意六自由度机器人手都适用。

最后,在分析了机器人运动学的基础上,采用拉格朗日法建立其动力学

方程,并进一步仿真分析其动力学,得到关节  $E$  点由  $P_2$  运动到  $P_1$  的过程中各个关节所受到的力及驱动力矩的变化曲线,以及在各个连杆变质量的情况下动能变化曲线的差异,得出在机器人优化设计时应尽量减小各个连杆的质量,以提高机器人的灵活性。

## 一、引言

### (一) 研究背景与意义

进入 21 世纪,机器人已成为现代工业不可缺少的重要工具,和计算机、网络技术一样,工业机器人的广泛应用正在日益改变着人类的生产和生活方式,它标志着工业的现代化程度。随着国内工业的迅猛发展,工业机器人在汽车制造行业的应用也越加广泛(尤其是点焊机器人),焊接机器人的工作状态稳定,能确保焊接质量。人工焊接时焊接工人经常会受到心理、生理以及周围环境的干扰。在恶劣的焊接条件下,操作工人容易疲劳,难以较长时间保持焊接工作稳定性和一致性。机器人点焊工作站作为一个灵活、可靠、通用的点焊柔性加工单元(SWFMC),只需通过简单的机器人程序调整及工作参数、焊枪的更改就可以应用于不同的汽车焊装线。这样不仅可提高产品的质量与产量,而且对保障人身安全,改善劳动环境,减轻劳动强度,提高劳动生产率,降低工人误操作带来的残次零件风险,提高企业竞争力,节约原材料消耗以及降低生产成本等。因此,要不断地实现工业机器人代替人工作业,还要不断地提高焊接机器人的焊接精度、提高焊件质量、提高劳动生产率、降低工人劳动强度具有非常重要的意义。

### (二) 工业机器人的现状和发展趋势

1961 年,美国的 Consolidated Control Corp 和 AMF 公司联合制造了第一台实用的示教再现型工业机器人,迄今为止,世界上对工业机器人的研究已经经历了四十余年的历程,日本、美国、法国、德国的机器人产业已日趋成熟和完善。工业机器人由操作机(机械本体)、控制器、伺服驱动系统和检测传感装置构成,是一种仿人操作、自动控制、可重复编程、能在三维空间完成各种作业的机电一体化自动化生产设备。特别适合于多品种、变批量的柔性生产。它对稳定、提高产品质量,提高生产效率改善劳动条件和产品的快速更新换代起着十分重要的作用。目前,正式投入使用的绝大部分是第一代机器人,即程序控制机器人,这代机器人基本上采用点位控制系统,没有感觉外界环境信息的感觉器官,主要用于焊接、喷漆和上下料。

第二代机器人具有感觉器官,仍然以程序控制为基础,但可以根据外界

环境信息对控制程序进行校正。这代机器人通常采用接触传感器一类的简单传感装置和相应的适应性算法。

现在,第三代机器人正在第一、第二代机器人的基础上蓬勃发展起来,它是能感知外界环境与对象物,并具有对复杂信息进行准确处理,对自己行为做出自主决策能力的智能化机器人。它能识别景物,具有触觉、视觉、力觉、听觉、味觉等多种感觉,能实现搜索、追踪、辨色识图等多种仿生动作,具有专家知识、语音功能和自学能力等人工智能。

在机器人前沿技术方面出现了仿人型机器人、微型机器人和微操作系统(如细小工业管道机器人移动探测系统、微型飞行器等)、智能机器人(不仅可以进行事先设定的动作,还可按照工作状况相应地进行动作,如回避障碍物的移动,作业顺序的规划,有效的动态学习等)。机器人的应用领域正在向非制造业和服务业方向扩展,并且蓬勃发展的军用机器人也将越来越多地装备部队。

在国外,工业机器人技术日趋成熟,已经成为一种标准设备被工业界广泛应用。目前有如下几个发展趋势:机器人性能不断提高,而单机价格不断下降;机械结构向模块化、可重构化发展;控制系统向基于PC机的开放型控制器方向发展;传感器作用日益重要;虚拟现实技术在机器人中的作用已从仿真、预演发展到用于过程控制。

在我国,工业机器人的真正使用到现在已经接近30多年了,已经基本实现了试验、引进到自主开发的转变,促进了我国制造业、勘探业等行业的发展。随着我国门户的逐渐开放,国内的工业机器人产业将面对越来越大的竞争与冲击,因此,掌握国内工业机器人市场的实际情况,把握我国工业机器人研究的相关进展,显得十分重要。我国的工业机器人从80年代“七五”科技攻关开始起步,在国家的支持下,通过“七五”、“八五”科技攻关,目前已基本掌握了机器人操作机的设计制造技术、控制系统硬件和软件设计技术运动学和轨迹规划技术,生产了部分机器人关键元器件,开发出喷漆、弧焊、点焊、装配、特种、搬运等机器人。还掌握了自动化喷漆线、弧焊自动线及其周边配套设备的全套自动通信、协调控制技术;在基础元件方面,谐波减速器、机器人焊接电源、焊缝自动跟踪装置也有了突破。从技术方面来说,我国已经具备了独立自主发展中国机器人技术的基础。

从近几年世界机器人推出的产品来看,工业机器人技术正在向智能化、模块化和系统化的方向发展,其发展趋势主要为:结构的模块化和可重构化;控制技术的开放化、PC化和网络化;伺服驱动技术的数字化和分散化;多传

传感器融合技术的实用化；工作环境设计的优化和作业的柔性化以及系统的网络化和智能化等方面。

### （三）焊接机器人运动学和动力学国内外现状

焊接机器人具有焊接质量稳定、改善工人劳动条件、提高劳动生产率等特点，当前焊接机器人的应用迎来了难得的发展机遇。一方面，随着技术的发展，焊接机器人的价格不断下降，性能不断提升；另一方面，劳动力成本不断上升，我国由制造大国向制造强国迈进，更需要改进加工手段，提高产品质量和增强企业竞争力，这一切预示着机器人应用及发展前景空间巨大。

我国焊接机器人的应用主要集中在汽车，摩托车，工程机械，铁路机车等几个主要行业。基于虚拟样机技术的研究也在不断进步，在机器人运动学和动力学上，国内一些学者在其仿真方面进行了实验性的研究。在 2000 年白丽平<sup>[1]</sup>等人针对 SIA120 点焊机器人进行了运动学分析，其逆解采用了传统方法即代数法。对应给定末端位姿，有八组位形对应，虽然给机器人的操作带来一定的灵活性，但却给机器人的控制带来了问题，需要对各个解按照各种准则优化。在 2001 年李友虎<sup>[2]</sup>等人采用几何法针对三自由度机器人求其逆解，该机器人结构简单，但为逆解求解找到了一种简单可行的办法。2001 年 9 月刘义翔<sup>[3]</sup>等人针对六自由度点焊机器人设计过程中的动力学问题，通过建立 PRO-E 几何模型，利用 ADAMS 对其大臂机械动力学进行仿真分析。研究了机构关节的运动过程及其工作极限点，并在给定机构关节运动范围内，仿真研究其动力学特性。2002 年 9 月刘成良<sup>[4]</sup>等人提出用 Lagrangian 方法导出机器人的动力学方程，而用递推的 Newton-Euler 方法求解机器人逆动力学问题。仿真结果表明，可以通过计算机仿真在选择关节初始值时避开不稳定的情况。2003 年 10 月叶长龙<sup>[6]</sup>等人在分析了含简单闭链 5R 焊接机器人的结构特点的基础上，针对做两圆柱相贯线运动的作业要求，提出了一种有效轨迹规划方法，用几何法完成了空间位姿的描述，利用变角速度实现稳定的运动效果，在比较多种插值函数的基础上，对关节变量做了多项式插值，用几何矢量法完成逆运动学求解。并用凯恩方法对机器人的动力学进行了计算，设计了仿真程序，对仿真结果进行分析并改进机构。2004 年 6 月沈红芳、郑建荣<sup>[4]</sup>利用 ADAMS 软件强大的建模，参数化优化设计功能，对 6 自由度最大负荷 5kg 的弧焊机器人建立了虚拟样机模型，并在此基础上以机器人主要构件的结构参数为设计变量，进行动力学优化设计研究，为机器人产品设计和进一步优化设计提供了参考。2005 年 11 月底熊震宇<sup>[7]</sup>等人采用 CAD 软件 CATIA 和机械系统动力学仿真软件 ADAMS，对德国 CLOOS 公司生产的

76AW 型弧焊机器人建立了三维运动仿真模型。采用 D-H 方法建立了连杆坐标系下的机器人运动学模型, 并采用 Matlab 编写了运动学正逆解程序。实现在 ADAMS 环境下的机器人焊缝路径的运动仿真。为机器人动力学及离线编程技术的研究提供了基础, 充分发挥了 PRO-E 和 ADAMS 应用软件的优点。在 2005 年 12 月沈红芳, 宋又廉<sup>[8]</sup>采用 Kane 方法, 建立了含局部闭链的关节坐标型弧焊机器人动力学方程式, 用 ADAMS 软件对在典型运动状态下机器人的动力学特性进行了仿真分析, 对机器人在各种工况下的动力学特征进行分析和研究, 结果可作为关节驱动电机和减速器选择的重要依据; 并可据此分析结果进行动力学优化, 提高系统的整体性能。在 2006 年莫才颂<sup>[9]</sup>等人针对机器人的实际系统, 采用机器人运动学逆解计算的代数方法, 从理论上找到了包含机器人空间位姿真解的数学表达式, 完善了机器人运动学逆解算。通过计算机仿真结果表明, 只要机器人各关节角在给定范围内选取, 得出的可能解就符合实际情况。同年, 石炜<sup>[10]</sup>等人对六连杆机器人的运动学进行了分析, 利用坐标变换法和符号法对六连杆机器人的运动学方程进行推导, 得到了六连杆机器人的正向位姿矩阵变换和逆运动学求解的通用公式。2007 年张卫锋<sup>[11]</sup>等人基于 UG 和 ADAMS 的变形移动机器人的动力学仿真分析, 通过对机器人驱动关键点的动力学分析, 得到的仿真结果可对机器人机构的动力学特性进行直观检验。同时, 通过对变形移动机器人的动力学分析, 有效地保证了机器人在该运动状态下优良精确的动态特性和静态特性。2007 年余张国<sup>[12]</sup>等人针对 TF-1 型弧焊机器人的运动学建模研究, 根据 TF-1 型机器人的结构特点, 找到一些关节的联动不会产生某轴线的运动, 即矩阵联乘后一些元素会为零。根据这些为零的元素, 率先突破一些关节角的逆解。仿真结果表明了这种方法的有效性, 它减少了机器人的计算负荷, 有利于提高机器人控制的实时性。这种求解方法及其所得的结果对于其他类似结构的六自由度工业机器人具有一定的借鉴作用。同年, 喻强<sup>[13]</sup>针对集装箱波纹折线焊缝的焊接难题, 设计了一种三自由度焊接机器人。在 D-H 齐次变换矩阵的基础上, 对焊接机器人进行运动学逆解。实际控制时, 根据实际的焊缝形状, 通过运动学逆解求出其他两个关节的变化规律。三自由度焊接机器人 3 个运动关节按照一定的运动规律协调动作, 较好地解决了波纹直线焊缝与波内斜边焊缝成形不能保持一致的难题。通过 Matlab 软件仿真, 控制各个关节按照给定规律运动, 在 Matlab 环境下实现了恒定焊接速度下的轨迹的跟踪。

在机器人运动学及动力学仿真技术研究方面国外很早就投入了大量的研究, 尤其是在机器人运动学逆解的算法上, 1984 年 Lec C S G. Ziegler M<sup>[37]</sup>对



6 自由度机器人进行分析,其几何结构同人的手臂相似,并分两个阶段求其逆解,即前三个关节和后三个关节,得出结论:前三个关节控制机器人末端执行器的位置,后三个关节则控制机器人末端执行器的姿态。最后通过计算机仿真验证了该方法的有效性。在 1998 年 Fu Hongguang<sup>[38]</sup> 等人针对三自由度的可任意固定位置的机器人利用几何变量在机器人运动过程中的不便性推导其封闭形式求逆解,该方法适用类似的关节机器人。在轨迹规划上,1983 年 Perez<sup>[39]</sup> 提出了 C 空间理论用来解决机器人的碰撞,为机器人的焊接路径的规划提出了基本的理论基础。1985 年 Shin 和 Mckay<sup>[40]</sup> 基于黎曼几何理论,针对一种特定条件问题,提出了近似最短时间路径规划法。1990 年 Parsons<sup>[41]</sup> 讨论了在二维空间中多个做平移运动的移动机器人规划问题。沿任意指定路径的优化轨迹不一定是最佳轨迹,就有对指定路径起点和终点的一般优化问题。2002 年 L. Romdhane<sup>[36]</sup> 设计了一种新的三自由度平移机器人,三可变长度的腿构成了驱动器的机械手,根据几何和矢量法对运动学的分析解决了此并联机器人的奇异问题。在 2003 年 Marco Carricato<sup>[45]</sup> 等人针对六自由度并联机器人的运动学进行分析,正解采用数值解析法,逆解根据并联结构几何关系求解,且得到该型机器人的封闭解形式,运动学方程结合控制软件可以达到较高的效率,可运行在高采样率的机器人上。

运动学正问题的研究目前主要是利用齐次坐标变换矩阵方法将位置和姿态统一描述,该法思路清晰,但运算速度较慢,随着机器人机构自由度的增加对运动学逆问题的讨论带来很多不便。运动学逆问题比正问题复杂得多,主要表现在逆解的存在性和唯一性,存在性决定机器人的操作空间,逆解一般来说非唯一。目前对具有特殊形状的机器人机构如球形手腕机器人机构,其逆解是封闭的,但并不唯一。数学上尚无完备的方法求其解析解,机构学研究者采用数值分析的方法,取得了一系列进展。但是多数或者算法不稳定,或者过分依赖初值,且计算量大,求解速度慢。运动学方程的建立与求解是一个机器人系统的关键技术,一直受到广泛的关注,但仍然是当今的一个研究热点,有着一定的发展空间。

#### (四) 问题提出及主要任务

由于我国工业机器人正处于发展阶段,工业生产上 70% 要用到焊接机器人,尤其是点焊更为重要,这就需要点焊精度的提高,提高焊件的质量,提高生产率并及时解决一些生产实际中遇到的问题。运动学逆解是机器人空间运动规划和轨迹控制的基础,是机器人运动分析、运动仿真、离线编程的关键。因此,在提高焊接机器人焊点位置精确度,提高焊件质量,提高劳动生

产率,降低工人的劳动强度上运动学逆解也至关重要。本专题重点分析逆解求解方法以及计算,并借助 ADAMS 软件仿真分析其运动学及动力学特性。具体如下:

1. 根据 D-H 矩阵方法建立 ABB IRB-1400 型机器人运动学方程,推算其运动学正解。拟订机器人点焊过程中的两点对逆问题采用几何法求逆解,并根据机器人的极限位置数据验证该几何法求解公式的正确性。

2. 针对 ABB IRB-1400 型六自由度点焊机器人,根据其实际主要几何参数利用 CATIA V5 R17 软件建立其各个零部件的几何模型,并将各个零部件进行装配。

3. 借助于 ADAMS 和 CATIA 的接口仿真软件 Simdesinger 将几何模型进行简单的约束再导入到 ADAMS 中进行仿真分析,验证该几何法求解公式的正确性。

4. 采用拉格朗日法建立机器人的动力学方程。仿真分析机器人运动学正逆问题,并进一步验证该几何模型建立和几何法求逆解的正确性和适用性。

## 二、机器人运动学数学描述

机械手是机器人系统的机械运动部分。作为自动化工具的机械手,它具有如下特点:它的执行机构是用来保证复杂空间运动的综合刚体,而且它自身也往往需要在机械加工或装配等过程中作为统一体进行运动。因此,我们需要一种用以描述单一刚体位移、速度和加速度以及动力学问题的有效而又方便的数学方法。这种数学描述方法不是唯一的,不同的人采用不同的方法。本文采用矩阵法来描述机器人机械手的运动学和动力学问题。这种数学描述是以四阶方阵变换三维空间点的齐次坐标为基础的,能够将运动、变换和映射与矩阵运算联系起来。研究操作机器人的运动,不仅涉及机械手本身,而且涉及各物体间以及物体与机械手的关系,齐次坐标变换不仅能够表示动力学问题,而且能够表达机器人控制算法、计算机视觉和计算机图形学等问题。

### (一) 位姿描述

机械手是机器人的执行装置,由它来实现指定的运动,所以对组成机械手的每一连杆与其他连杆及工作空间位置和姿态的求算是必要的。要确定一个物体的几何状态需要有 3 个位置自由度和 3 个姿态自由度,我们将物体的 6 个自由度的状态称为物体的位姿,既位置和姿态<sup>[18]</sup>。

#### 1. 位置描述

如图 2-1 所示,点  $P$  代表手端的位置,则  $P$  点的位置可以用  $3 \times 1$  的列向

量 ${}^A\mathbf{P}$ 表示。其中： $P_x, P_y, P_z$ 是机器人末端执行器手腕的中心点 $P$ 在 $\{A\}$ 中的三个坐标分量，建立了坐标系之后，我们就能用一个位置矢量来确定该空间的任意点。即手坐标系 $\{A_n\}$ 在基坐标系 $\{A\}$ 中的位置。

$${}^A\mathbf{P} = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} \quad (2-1)$$

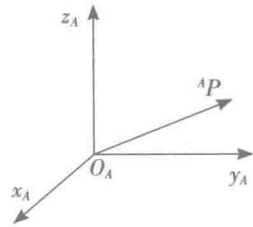


图 2-1 坐标位置表示

## 2. 方位描述

为了研究机器人的运动和操作，不仅要表示空间某一点的位置，而且需要表示物体的方位。物体的方位可由某个固连于此物体的坐标系描述。为了规定空间某刚体 $B$ 的方位，设置一直角坐标系 $\{B\}$ 与此刚体固接。用坐标系 $\{B\}$ 的三个单位主矢量 $x_B, y_B, z_B$ 相对于参考系 $\{A\}$ 的方向余弦组成的矩阵来表示刚体的方位。如图 2-2 所示。

$$\begin{aligned} {}^A\mathbf{R}_B &= [{}^A x_B \quad {}^A y_B \quad {}^A z_B] \\ &= \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2-2)$$

对应于轴 $x, y, z$ 旋转角为 $\theta$ 角的旋转变换，其变换矩阵分别为：

$$\mathbf{r}(x, \theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (2-3)$$

$$\mathbf{r}(y, \theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (2-4)$$

$$\mathbf{r}(z, \theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-5)$$

## 3. 姿态的描述

上面我们已经讨论了采用位置矢量描述点的位置，而用旋转矩阵描述点的方位。要完全描述刚体 $B$ 的空间位姿，

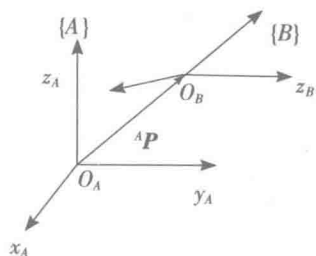


图 2-2 坐标方位描述

通常将物体 B 与某异坐标系  $\{B\}$  相关节。坐标系  $\{B\}$  的原点一般选在物体 B 的特征点上, 如质心等。相对参考坐标系  $\{A\}$ , 坐标系  $\{B\}$  的原点位置和坐标轴的方位分别用位置矢量  ${}^A\mathbf{P}_B$  和旋转矩阵  ${}^A\mathbf{R}_B$  描述。这样刚体 B 的位姿可由坐标系  $\{B\}$  来描述, 即有:  $\{B\} = \{{}^A\mathbf{R}^A\mathbf{P}_B\}$ 。

## (二) 齐次坐标变换

已知一直角坐标系中的某一点坐标, 那么该点在另一直角坐标系中的坐标可以通过齐次坐标变换求得:

$$\begin{bmatrix} {}^A\mathbf{P} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^A\mathbf{R} & {}^A\mathbf{P}_{BO} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^B\mathbf{P} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2-6)$$

其中  $4 \times 1$  的列矢量表示三维空间的点, 称为点的齐次坐标, 可把上式写成矩阵形式:

$${}^A\mathbf{P} = {}^A\mathbf{T}^B\mathbf{P} \quad (2-7)$$

其中齐次变换矩阵  ${}^A\mathbf{P}, {}^B\mathbf{P}$  是  $4 \times 1$  的列矢量, 与式 (2-7) 的维数不同, 加入了第四个元素 1。齐次变换矩阵  ${}^A\mathbf{T}$  是  $4 \times 4$  的方阵, 具有如下的形式:

$${}^A\mathbf{T} = \begin{bmatrix} {}^A\mathbf{R} & {}^A\mathbf{P}_{BO} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-8)$$

其中,  ${}^A\mathbf{T}$  综合地表示了平移变换和旋转变换。如图 2-3 所示。

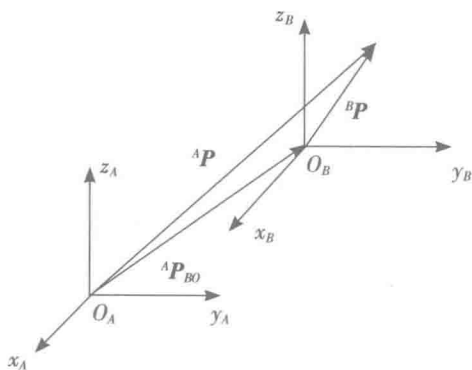


图 2-3 坐标平移变换与旋转变换

$$\text{平移齐次变换为 } \text{Trans}(a, b, c) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & b \\ 0 & 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-9)$$

旋转齐次变换为:

$$\text{Rot}(x, \theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-10)$$

$$\text{Rot}(y, \theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-11)$$

$$\text{Rot}(z, \theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-12)$$

式中, Rot 表示旋转变换。

### (三) 机器人的 D-H 参数和连杆变换

可以把机器人的机械手看作是一系列由关节连接起来的连杆构成的<sup>[19,20]</sup>。我们将机械手的每一连杆建立一个坐标系,并用齐次变换来描述这些坐标系间的相对位置和姿态。工业机器人机械手通常由转动关节和移动关节构成,每个关节有一个自由度。为了描述相邻杆件间的旋转和平移关系,Denavit 和 Hartenberg 于 1955 年提出了一种为关节链中的每一杆件建立构件坐标系的矩阵方法,即 D-H 方法,采用  $4 \times 4$  的齐次变换矩阵来描述机器人相邻两杆  $i$  和  $i-1$  的空间几何关系,既一个连杆与下一个连杆间相对关系的齐次变换,这个矩阵被称为  $A$  矩阵。这样通过逐次变换,用“手部表示”的末端执行器可以被变换并用“基座坐标”表示。按照 D-H 方法所确定的连杆坐标系,每个连杆可由 4 个参数  $a_i$ ,  $\alpha_i$ ,  $d_i$ ,  $\theta_i$  来描述。这种关系可由表示连杆  $i$  对连杆  $i-1$  相对位置的四个齐次变换来描述,并叫作  $A_i$  矩阵。此关系式为:

$$A_i = \text{Rot}(x, \alpha_i) \text{Trans}(a_i, 0, 0) \text{Rot}(z, \theta_i) \text{Trans}(0, 0, d_i) \quad (2-13)$$

### (四) 机器人的运动学方程的建立

机械手可以看作一系列由关节连接起来的连杆构成的一个开式运动链,它是由一系列连杆通过转动或移动关节连接而成的。开链的一端固定在地面基座上,另一端是自由的,安装着工具(或称为末端执行器),用来完成各种作业。关节由驱动器驱动,使连杆之间发生相对运动,从而使末端工具到达所需的位姿。为了研究机械手的运动学,我们将为机械手的每一连杆建立一个坐标系,并用齐次变换来描述这些坐标系间的相对位置和姿态。采用 D-H

方法，建立本机器人的  $A_i$  矩阵为（式（2-13）的展开）：

$$A_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i \cos\alpha_i & \sin\theta_i \sin\alpha_i & a_i \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i \cos\alpha_i & -\cos\theta_i \sin\alpha_i & a_i \sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-14)$$

如果  $A_1$  表示第一个连杆对于基坐标系的位置和姿态， $A_2$  表示第二个连杆相对于第一个连杆的位置和姿态，那么第二个连杆在基坐标系中的位置和姿态可由下列矩阵的乘积给出：

$$T_2 = A_1 A_2 \quad (2-15)$$

同理，一个六连杆机械手可具有六个自由度，每个连杆含有一个自由度，并能在其运动范围内任意定位与定向。其中，三个自由度用于规定位置，而另外三个自由度用来规定姿态。根据上述可得：机器人末端执行器对基座的关系：

$$T_6 = A_1 A_2 A_3 A_4 A_5 A_6 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & P_x \\ n_y & o_y & a_y & P_y \\ n_z & o_z & a_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-16)$$

式（2-16）为建立起的机器人运动学方程，其中  $[n \ o \ a]$  为姿态矩阵， $[P]$  为位置向量。运动学方程的建立是运动学系统研究的基础，对研究机器人运动学问题起着主要的作用。

### （五）小结

本部分主要论述了工业机器人运动学及动力学的数学基础，包括空间任意点的位置和姿态的表示、坐标和齐次坐标变换、旋转齐次坐标变换以及 D-H 参数。在采用位置矢量描述点的位置，用旋转矩阵描述物体方位的基础上，物体在空间的位姿就由位置矢量和旋转矩阵共同表示，为机器人的运动学及动力学分析奠定了数学基础。

## 三、IRB1400 型机器人的运动学

机器人运动学是专门研究物体运动规律，而在研究中不考虑产生的力和力矩，它涉及到运动物体的位置、速度、加速度和位置变量对时间的高阶导数。实际上，机器人运动学研究有两类问题：一类是给定机器人各关节角度，求计算机器人手爪的位置与姿态问题，称为正向运动学；另一类是已知手爪的位置与姿态求机器人对应于这个位置与姿态的全部关节角，称为逆向运动

学。显然，正问题是简单的，解是唯一的。但逆问题的解是复杂的，而且具有多解性，这给问题求解带来困难，往往需要一些技巧与经验。

### (一) IRB1400 机器人主要结构参数与性能

IRB1400 型机器人是 20 世纪 90 年代瑞典的 ABB 公司的成熟产品，关节配置为多关节型，具有六个自由度，最大工作半径 1444mm，最大承载 5kg，常用于焊接与小范围搬运。与其他现代工业机器人一样，IRB1400 型机器人由两部分组成：机器人本体和控制器。

IRB1400 型机器人的本体部分主要是机器人的关节（即轴）、末端执行器以及交流伺服机构等三部分组成。机器人按关节配置可以分为笛卡儿坐标型、圆柱坐标型、极坐标型以及多关节型。其中多关节型配置最接近人的构造，主要由多个回转关节和移动关节组成，运动不同的关节连接方式，可以完成各种复杂的操作运动。由于占地面积小、动作范围大，空间移动快而灵活等特点，多关节型机械手已经广为智能机器人所采用。IRB1400 型机器人的关节配置就是多关节型，由六根轴组成的多关节型机器人，通常分别称之为腰部、肩部、手臂、手腕等，但是，其刚性比较差，所以 IRB1400 型机器人的运动和控制方面有很大的代表性。末端执行器即通常所说的机器人手掌或手爪，由用户按照机器人的工作任务自行设计或购买的标准部件组装而成。一般来说，末端执行器的动力来源独立于机器人，有来自电机、气动的还有来自液压元件的。末端执行器的控制可以利用机器人的控制接口来实现。可以在机器人编程中调用这些口。机器人伺服系统是由计算机控制介入典型的闭环控制系统，具有精度高、响应速度快、不易受操作条件影响等特点。

IRB1400 机器人由六个转动关节构成如图 3-1 和图 3-2 所示，是一种 6 自由度的工业机器人。

IRB1400 型机器人的各个关节的运动范围：(1) 旋转运动  $170^{\circ} \sim -170^{\circ}$ ；(2) 臂运动  $70^{\circ} \sim -70^{\circ}$ ；(3) 臂运动  $70^{\circ} \sim -60^{\circ}$ ；(4) 腕运动  $150^{\circ} \sim -150^{\circ}$ ；(5) 摆动运动  $115^{\circ} \sim -115^{\circ}$ ；(6) 扭转运动  $300^{\circ} \sim -300^{\circ}$

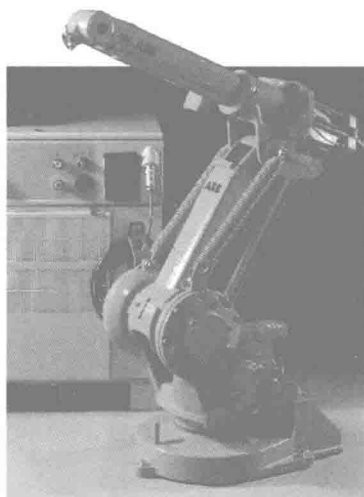


图 3-1 IRB1400 型机器人实体

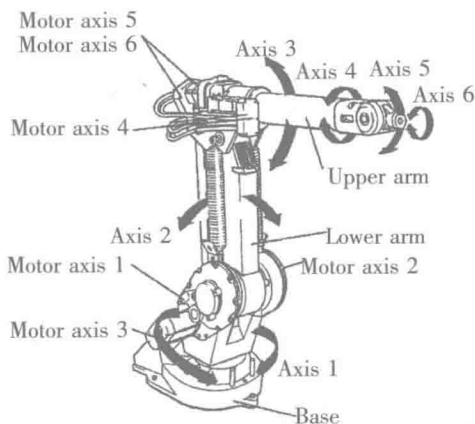


图 3-2 IRB1400 型机器人结构图

机器人的性能指标一般包括很多方面的内容。主要包括自由度、工作空间范围、承载能力、运行速度、精度等几个方面的性能指标。机器人的自由度是指末端执行器相对于机座的独立运动的个数，是机器人的最重要的参数。它决定着机器人的工作空间和功能。在机器人学中，我们一般将机器人的“能够进行单位动作组合的独立运动数”称之为机器人的自由度。它是表达机器人灵活性与通用性的主要指标。机器人要在三维空间完成某些作业，一般也需要 6 个自由度。当然机器人的自由度数目要与它的工作任务要求相适应，不是所有机器人都要有 6 个自由度。IRB1400 型工业机器人具有较强的功能，具有 6 个自由度，在机器人中具有很强的代表性。值得注意的是，从本质上讲，空间自由度的定义机器人在一定范围内完成某些任务，不会多于 6 个自由度。但实际上，为了避免碰撞以及机械手的灵活性，常要求有冗余度的机器人（即机器人关节自由度总和大于 6 的机器人）。智能机器人往往具有 6 个以上自由度。但是自由度越多，结构越复杂，运动分析越困难。

工作空间又称为工作范围，是指机器人运动时手腕中心或工具安装点能够到达的所有空间区域，不包括手爪或工具本身能到达的区域。工作空间必须与被加工的工件和使用的夹具相适应。工作空间的大小不仅取决于机器人的各个连杆的尺寸，还与总体构形有关。IRB1400 型工业机器人的工作空间可参见图 3-3 主要性能指标。按照机器人在工作空间的功能又将工作空间分为灵活工作空间和可达工作空间。灵活工作空间是指机器人末端执行器在所有方位都能达到的空间领域。在这个区域内的每一个点，末端执行器可任意定向。可达工作空间是指末端执行器至少在一个方向上能达到的空间领域。由此可见，灵活工作空间是可达工作空间的子集。图 3-4，3-5 所示为 IRB1400



型机器人的主要结构尺寸及工作空间。

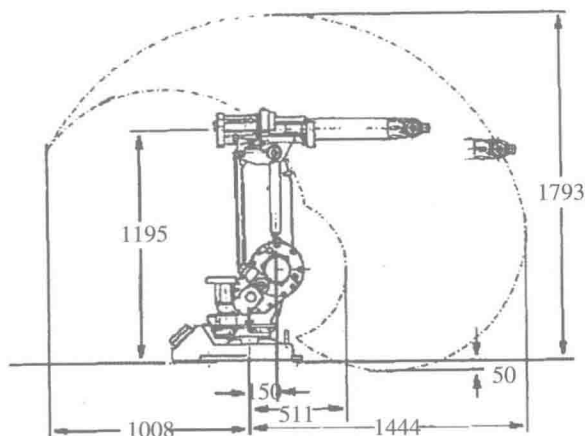


图 3-3 IRB1400 型机器人的工作空间

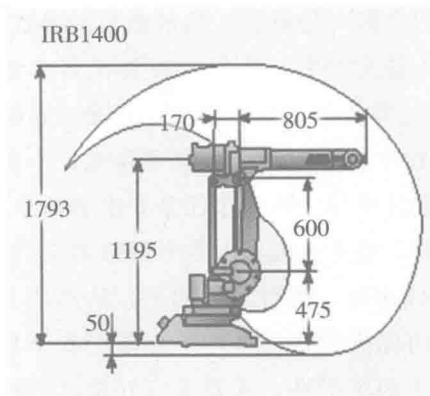


图 3-4 IRB1400 型机器人主要结构尺寸

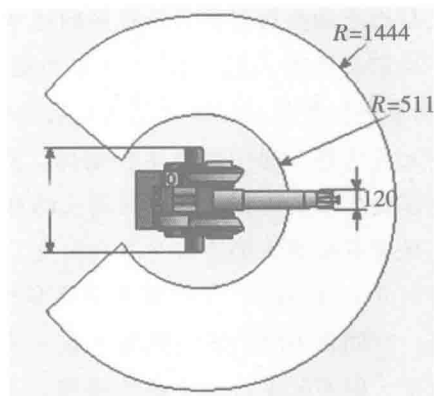


图 3-5 IRB1400 型机器人的工作空间

承载能力是机器人搬运重物的能力。承载能力取决于构件尺寸和电机的功率，此外还与运行的速度有关。在低速运行下的承载能力相对要比高速运行下的承载能力大。机器人的承载能力，主要是指在低速下的承载能力。IRB1400 型工业机器人的承载能力为 5kg，所以一般它只能用来小范围内的搬运和焊接。

精度是机械手达到某一点的能力的量度，分为定位精度和重复精度。精度对离线编程极为重要，尤其是点焊过程。在编程中确定机器人移动位置的坐标可由数据库获得。定位精度是一个位置量相对其参照系的绝对度量，是指机器人末端执行器实际达到位置与要求达到的理想位置之间的差距。重复精度是指相同的运动位置指令下，机器人连续重复运动若干次，其位置之间