

上海交通大学

SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

# 机械人学课程论文



论文题目: 六自由度协作机械臂

学生姓名: \_\_\_\_\_

指导教师: 吴建华 熊振华

学生学院(系): 机械与动力工程学院

# 六自由度协作机械臂

## 摘要

机械臂是机器人中常见且广泛使用的执行机构之一，对它的原理进行研究有着十分重要的意义，完整机械臂的系统包括机械结构电子硬件，软件程序，逻辑算法四个主要部分各个部分相互之间都是紧密相联的，故而设计各部分时需要互相协调，从而保证系统能够稳定运行。

项目主要从以下几个方面进行了具体的研究：

首先，仔细查阅国内外机械设计的相关文献，确定具体的机构。通过各杆件长度与质量关系，运用静力学分析各关节的力矩关系，依据自平衡机器人的基本结构，从而设计出整套机械臂的基本结构方案，并对各个部分的零件选用及设计进行基本分析。

其次，尝试完成机械臂运动学、轨迹规划方面算法的实现，完成位置、速度和力矩伺服控制算法的实现，建立机械臂的数学校型，对机械臂的运动学进行相关的分析。

最后，基于 Solidworks 的三维模型的构建和 matlab 动态仿真实验，完成了动力学和力学仿真检验，构建轨迹规划的直观展示。

**关键词：**solidworks 三维建模、正逆求解、matlab 仿真分析、轨迹规划

## 目 录

第一章 绪论-----	1
1.1 概述-----	1
1.2 机器人的背景与发展历程-----	2
1.3 机器人研究现状-----	3
1.3.1 机器人国外研究现状-----	3
1.3.2 机器人国内研究现状-----	3
1.4 课题的研究目的及主要研究内容-----	4
第二章 机械臂结构设计-----	5
2.1 机械臂材料及尺寸选择-----	5
2.2 机械臂 3D 建模展示-----	7
2.3 电机选型-----	9
第三章 机械臂的系统及仿真分析-----	10
3.1 运动学求解-----	10
3.1.1 理论求解-----	10
3.1.2 matlab 求解-----	11
3.2 运动学仿真-----	12
3.3 动力学仿真-----	13
3.4 轨迹规划-----	14
第四章 结论和展望-----	15
第五章 项目总结-----	16
5.1 会议记录-----	17
5.2 人员分工-----	18
5.3 项目进展-----	19
参考文献-----	20
致谢-----	21

# 第一章 绪论

## 1.1 概论

机器人是近代科学技术快速发展的朝阳领域,而且是高新技术的集成体现。20 世纪 60 年代以来,伴随着微机技术的不断发展,机器人的科学与技术开始了迅猛的进步。现在,全世界已经有上百万台的机器人在各个不同领域应用。

机器人的系统包括机械结构、电子硬件、软件程序、逻辑算法四个主要部分。能仿人操作、可自动调整、可重复编程、且在三维空间能完成各种工作的机电一体化自动化生产设备,这是机器人最基本的特点。机械臂是机器人中最广泛存在的执行机构之一,特别适于多个品种的、批量变化的柔性生产系统。它的发展和研究对于持续提升产品的质量、提高生产的效率、改进劳动的条件和产品的快速更新换代有着十分重要的意义。

机器人的技术是综合控制论、机械学、计算机、信息传感技术、人工智能仿生学等多种学科从而形成的高新综合技术,建立在多个学科发展的基石之上,具有应用领域广阔、技术新颖、学科综合性与重合性强等特点。在当代研究中是十分活跃且应用日益宽泛的新领域。

机器人的实用情况,是一个国家工业自动化水平的重要体现。

伴随着机器人的使用越来越广泛 对机器人的调整也有了更高水平的要求。由于实际使用环境的万般变化 很难在短时间内找到最优轨迹的解,以及最适合的结构比例,这时就很有必要用到对于机器人的运动仿真系对机器人进行图形的仿真,可以将仿真结果以图形图表的方式直观的形象的表达出来可以很容易得到数据曲线和数据本身部分难以直接取得的信息 还可以从图形上看到机器人在不同控制条件下的不同运动规律。这样,就可以在实际调试机器人设备前对它的运动进行仿真 进而减少实际调试的时间 优化运行轨迹 提升生产效率。

本文的主要内容包括六自由度机器人运动学方程的求解公式推导,通过理论计算验证仿真模型的正确性,并通过三维建模与 matlab 对动力学和运动学检验。

## 1.2 机器人的背景与发展历程

“机器人”是一个新造词，存在于多种不同的语言和文字中，它展现了人类长期以来的一种渴望，即能够制造出近似人一样行动或工作的机器或人造人，以便有可能去代替人进行各种各样的劳动。

1920 年，捷克剧作家卡内尔·凯佩克在他创作的情节幻想剧《罗萨姆的万能机器人》，首次提出机器人这个名词。各国语言对机器人的翻译方法，几乎都从斯洛伐克语 *fobota* 音译为罗伯特只有中国对其意译为“机器人”。

1939 年，在美国纽约举办的世界博览会，展出了“西屋电气公司设计创造的家务机器人 Elektro”。它是由电缆进行控制，能够行走，会说 77 个词，甚至还会吸烟，然而距离其真正的能够进行家务劳动还差得很远很远。但是，它的出现还是让众人对家务机器人的憧憬变得更加的详细和具体。

1942 年黄金科幻时代的美国文学大师阿西莫夫提出机器人三定律，即：

- (1) 机器人不应伤害人类；
- (2) 机器人应遵守人类的命令，与第一条违背的命令除外；
- (3) 机器人应能保护自己，与第一条相抵触者除外。

这是第一次赋予给机器人的伦理性纲领，尽管这只是科幻小说里的创作。是机器人学术界却一直将这三项原则奉为机器人研究设计的基本准则。

1954 年，美国科学家乔治·德沃尔设计出首台可重复编写电子程序的工业机器人，并于 1961 年申请了该项机器人专利。

1959 年，乔治·德沃尔与发明家约瑟夫·英格伯格联手制造出第一台工业机器人。随后，创立了世界上首家机器人制造公司——*Animation*。因为英格伯格对工业机器人的不断研发和宣传，他也被赞誉为“工业机器人之父”。

1962 年，美国万能自动化 (*Unimation*)设计生产的首台机器人 *Unimate* 在美国通用汽车 (GM),开始投入生产,这一事件标志着第一代机器人的诞生。

20 世纪下半叶开始，世界机器人多种产业保持着持续增长的良好势头。进入 20 世纪 90 年代以来，机器人产品发展速度不断增加，每年增长率维持在 11%左右。2004 年增长率达到创记录的 20%。其中，亚洲机器人增长幅度最为突出，高达 43%。目前使用机器人最广泛的国家是日本，机器人总数占世界总占有量的 61%以上，其次美国、德国、新加坡使用机器人的数量也在飞速增加。

经过大半个世纪的发展，工业机器人在越来越多的生产领域开始了使用。装备制造产业中，特别是汽车工业生产之中，工业机器人得到了充分的应用。例如毛坯锻造、机械零件加工、自

动焊、冲压铸造、零件热处理、外表涂覆、上下料、自动装配检测以及仓库堆垛这些工作里，机器人已经逐渐的开始替代普通的工人劳作。

## 1.3 机器人国内外研究现状

### 1.3.1 机器人国外研究现状

第一台工业使用的机器人被制造出来之后，机器人在很多工业国家得到迅猛发展。使用领域逐渐从汽车产业向其他行业沁渗，按照国际机器人联合会的不完全调查，全球范围内机器人的市场前景优良，20 世纪后期开始，世界机器人产业一直保持着持续增长的势头。90 年代以来 机器人产业发展速度逐渐加快，每年增长率基本在 11%左右，2000 年增长率上涨到 15%，机器人最基本的使用方式有几种 一是机器人独立工作单元 二是拥有机器人的完整生产流水线，后一种方式在国外已成为机器人使用的主要类型，以机器人为中心的自动化生产流水线适用于现代制造产业品种繁多、批量不一的柔性生产领域，其具备广阔的市场前景和强劲生命潜力，已经生产了多个类型向汽车、电气、机械等领域的自动化生产设备和生产流水线。在工业化国家，机器人自动化生产流水线已然形成一个庞大的产业，每年的市场容量约 1000 亿美元。国际上著名的机器人自动化生产线以及物流与仓储自动化设备的集成供应商有 COMAIK、KUKA 、ABB ,ROSCIK、NDC 、SWISSLOG 、村田等。

按照国际机器人协会的不完全调查，2003 年内工业机器人出货量展现出强劲的增长趋势。就单与 2002 年相比，2003 年全球范围内机器人的出货量就增长了约 11%.预计，工业机器人的全球市场即将从 2002 年的 7 万台增长到 2006 年的 9 万台，每年稳定增长 7.5%。

### 1.3.2 机器人国内研究现状

伴着科学技术的发展和全球机器人技术的进步 国内机器人的研究、科技的开发以及工程应用等等方面都取得了长足的进步。80 年代后期到 90 年代期间，已经把机器人研究归入国家 863 计划的自动化产业的重要研究课题，开始机器人的基本理论、核心科技以及机器人相关的元件、高科技机器人的系统集成的研究和机器人在自动化领域的应用。在机器人型号方面，确定开始研究开发点焊、喷漆、装配、搬运、弧焊等等类型机器人为主。这是中国机器人行业从研究到实用迈出的关键一步。一批从事机器人研究、开发、应用的人才和队伍在实践中成长、

壮大，一批以机器人为主体的产业化基地已经破土而出。

不管根据工业机器人的使用数目上还是科技发展，国内还是十分落后于世界。但是我国作为一个以工业发展为主体的大国，不能只寄希望于其他国家的分享获得高新技术，必需主动的研究发展国内的高新技术，机器人是高新技术领域的重要课题之一，即将成为 21 世纪各国争夺的经济技术制高点。如何在 21 世纪期间使我国机器人的研究快速发展，提前使我国进入机器人大国队列，已经刻不容缓。目前的机械人使用基数太低，以工业机器人为例子，2010 年国内机器人占有量只达到世界占有量的 1.47-2 %，这与我国前期全球主要制造国身份的地位差异太多，加入这些差异只可通过进口的机器人设备来弥补，之中的高额损失是不能以货币的损失来统计的。可见，无论从资金方面考虑，还是从长远利益考虑，我们有必要自主地对机器人进行研究和开发。

虽然，国内的机器人课题研究开始都相较国外都晚了不少。但进展都十分的迅速，已经在工业机器人领域 特种机器人领域以及智能机器人等各个方由取得显著成果，为国内机器人的研究打下了坚实的基础。国内的机器人领域历经近 30 年的生长，已在实用化的路途上逐渐迈开步伐。

## 1.4 课题的研究目的以及主要研究内容

多自由度的机械臂作为当代机器人的一个普遍使用也是最重要的关键种类之一，伴随着科学技术不断更新换代。普通的机械臂只可以完成初步的操作或一种工作任务，多自由度的机械臂在众多的工业技术以及工程应用中能更加合理的进行部分实践操作，

在此背景下，本课题对六自由度机械臂的运动状态仿真和分析就显得格外的重要。

### 1、理论意义

六自由度机械臂由六个长短不同的关节构成，机械臂基座装在平台上。此种结构让机械臂几乎拥有无穷宽广的工作区间，而且 N 时具备移动性和可操作性，这让它强于其他的移动机器人以及典型的机械臂结构。另外，工作平台对比机械臂不单单拥有差异的动力学特征 并且考虑到其轨迹规划的差异特征，六自由度的机械臂相对于典型固化机械臂优势的同时，也拥有实际应用的诸多不便之处，例如解的优化、控制、路线规划和解决方案选择等等。因此，研究六自由度机械臂的行动轨迹规律有着非常重要的意义。

### 2、应用价值

本课题所研究的六自由度机器人具备自重轻、运行效率高、空间越障能力强、作业区域范围大等特性。在常用的窗口，通过控制不同的轴调整各关节不同角度来完成不同的任务，进行各种教学演示及工作。因力用的控制方法使通过软件 程序的编写来实现的 所以对于我国的工



业发展以及各种类的机械臂运用，例如现代化的自动焊接以及汽车领域的涂覆流水线等应用有着特别的意义。对于提高国内的动工业化水准也具有十分重要的意义。

主要研究内容：

理论计算分析并应用现有的一些数学模型，推导出机器人运动学的理论计算公式。

工作空间分析机器人的行动范围开始研究 便于之后机器人的运动轨迹规律探究和动力学测试。

硬件结构设计设计出整套机械臂的基本结构方案，并对各个部分的零件选用及设计进行基本分析。

软件仿真调试通过 Solidworks 绘制出机械臂的三维模型，并输出转换到 Adams 动态仿真软件。实时分析测试轨迹的运行，输出路线以及图表数据。

## 第二章 机械臂结构设计

### 2.1 机械臂材料及尺寸选择

在参考 UR5e 机械臂，并满足项目需求的前提下，机械臂材料选择如下：其中，基座选用球墨铸铁，关节选用铸铝，其余部分选用铸铝，兼顾刚度、强度和质量。

同时尺寸也参考 UR5e 机械臂，并为满足设计工况做出一定调整，使得机械臂臂长达到 1m，各关节具体尺寸指标由 DH 参数给出。基座高 120mm，长臂为 430mm，中臂长 370mm，短臂长 110mm，末端长 107mm。

### 2.2 机械臂 3D 建模展示

在参考市面上现有的机械臂后，小组成员利用所学知识建立了自己的机器人模型，并将建模用于之后的仿真分析中，建模效果展示如下：





图 2-1 机械臂建模图

## 2.3 电机选型

我们选择伺服电机作为动力源，由滚珠丝杠和同步皮带等组成结构简单而效率很高的传动机构。它的重复精度误差是 0.01%，根据设定参数实现精确控制，在高精度传感器、计量装置、计算机技术支持下，能够大大超过其他控制方式能达到的控制精度。在进行大概的估算之后，小组的电机选型如下表：

关节	伺服电机型号（松下 Panasonic）	额定功率/W	转子惯量/10 <sup>-4</sup> kgm <sup>2</sup>	额定转矩/N*m
J1	MSME152G1D	1500	3.17	4.77
J2	MSME102S1H	1000	2.35	3.18
J3	MHMD082G1B	750	1.61	2.4
J4	MSMD022G1B	200	0.16	0.64
J5	MSMD011G1V	100	0.054	0.32
J6	MSMD011G1V	100	0.054	0.32

表 2-1 电机选型

减速机用来精确控制机器人动作，传输更大的力矩，好的减速机能够减少机械臂运动中的扰动，更精准的完成预设的动作，本项目减速机选型如下表：

关节	减速机型号	减速比
J1	RV80N	129
J2	RV60N	121
J3	RV42N	126
J4	CSF-20-100-2A-GR	100
J5	SHD-20-100-2SH	100
J6	CSD-20-50-2UH	50

表 2-2 减速机选型

## 第三章 机械臂系统及仿真分析

### 3.1 运动学求解

#### 3.1.1 理论求解

机械臂的 DH 参数为：

	1	2	3	4	5	6
a	0	0	430	370	0	0
$\alpha$	0	$-90^\circ$	0	0	$90^\circ$	$90^\circ$
d	120	145	0	-35	110	107
$\theta$	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$\theta_4$	$\theta_5$	$\theta_6$

表 3-1

$$d_1 = 120, d_2 = 145, a_3 = 430, a_4 = 370, d_4 = 35, d_5 = 110, d_6 = 107$$

首先，推导机械臂的正向运动学方程，根据 DH 参数可以计算机臂的正向运动学方程为：

$${}^0T_6 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 {}^5T_6 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

其中：

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} c1 & -s1 & 0 & 0 \\ s1 & c1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, {}^1T_2 = \begin{bmatrix} c2 & -s2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_2 \\ -s2 & -c2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$${}^2T_3 = \begin{bmatrix} c3 & -s3 & 0 & a_3 \\ s3 & c3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, {}^3T_4 = \begin{bmatrix} c4 & -s4 & 0 & a_4 \\ s4 & c4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$${}^4T_5 = \begin{bmatrix} c5 & -s5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -d_5 \\ s5 & c5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, {}^5T_6 = \begin{bmatrix} c6 & -s6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -d_6 \\ s6 & c6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

接下来，根据给定的末端位姿 ${}^0T_6$ 求解对应的关节构型，也就是求解逆运动学：

关节 2、3、4 的转轴方向相同，因此 ${}^1T_4$ 可以表示为：

$${}^1T_4 = \begin{bmatrix} c234 & -s234 & 0 & -a_3c2 - a_4c23 \\ 0 & 0 & 1 & d_4 \\ -s234 & -c234 & 0 & -a_3s2 - a_4s23 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

那么， ${}^1T_5$ 可以表示为：

$${}^1T_5 = \begin{bmatrix} c234c5 & -c234s5 & s234 & d_5s234 - a_3c2 - a_4c23 \\ s5 & c5 & 0 & d_4 \\ -s234c5 & s234s5 & c234 & d_5c234 - a_3s2 - a_4s23 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

同时， ${}^1T_5$ 还可以表示为： ${}^1T_5 = ({}^0T_1)^{-1} {}^0T_6 ({}^5T_6)^{-1} =$

$$\begin{bmatrix} c1 & s1 & 0 & 0 \\ -s1 & c1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c6 & 0 & -s6 & 0 \\ -s6 & 0 & -c6 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} c1n_xc6 - c1o_xs6 + s1n_yc6 - s1o_ys6 & cla_x + sla_y & -c1n_xs6 - c1o_yc6 - s1n_ys6 - s1o_yc6 & cla_xd_6 + c1p_x + sla_yd_6 + s1p_y \\ -s1n_xc6 + s1o_xs6 + c1n_yc6 - c1o_ys6 & -sla_x + cla_y & s1n_xs6 + s1o_yc6 - c1n_ys6 - c1o_yc6 & -sla_xd_6 - s1p_x + cla_yd_6 + c1p_y \\ n_zc6 - o_zs6 & a_z & -n_zs6 - o_zc6 & a_zd_6 + p_z - d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

结果计算比较复杂，这里就不计算，具体结果参见 matlab 计算。

### 3.1.2 matlab 求解

求解变换矩阵 T 雅可比矩阵 J 部分代码展示如下，具体代码见附录：

```
function [J] = get_ur5_jacob(theta2, theta3, theta4, theta5, theta6)
%T01 = get_trans_from_DH(0, 0, 120, theta1);
T12 = get_trans_from_DH(0, -pi/2, 145, theta2);
T23 = get_trans_from_DH(430, 0, 0, theta3);
T34 = get_trans_from_DH(370, 0, -35, theta4);
T45 = get_trans_from_DH(0, pi/2, 110, theta5);
T56 = get_trans_from_DH(0, pi/2, 107, theta6);
T46 = T45 * T56;
T36 = T34 * T46;
T26 = T23 * T36;
T16 = T12 * T26;
J = zeros(6, 6);
J(1:6, 1) = get_jacob_row(T16);
J(1:6, 2) = get_jacob_row(T26);
J(1:6, 3) = get_jacob_row(T36);
```

图 3-1 求解雅可比矩阵程序

```
function [T] = get_ur5_T(theta1, theta2, theta3, theta4, theta5, theta6)
    T01 = get_trans_from_DH(0, 0, 120, theta1);
    T12 = get_trans_from_DH(0, -pi/2, 145, theta2);
    T23 = get_trans_from_DH(430, 0, 0, theta3);
    T34 = get_trans_from_DH(370, 0, -35, theta4);
    T45 = get_trans_from_DH(0, pi/2, 110, theta5);
    T56 = get_trans_from_DH(0, pi/2, 107, theta6);
    T = T01 * T12 * T23 * T34 * T45 * T56;
end
```

图 3-2 求解变换矩阵程序

最后结果如图：

图 3-3 雅可比矩阵和变换矩阵结果

## 3.2 运动学仿真

问题描述：给定机械臂初始位姿  $q = [0, 0, 0, 0, 0, 0]$ ，以及机械臂终了位姿  $q = \pi/180 [-7.6, 38, 48.2, 38, 78.6, 38.0]$ ，通过对机械臂正运动学以及逆运动学模型控制机械臂由起始点运动到终了点。

利用 matlab 的机器人工具包，并且借助我们之前写的雅可比矩阵求解程序，我们能够很容易的实现正逆运动学仿真。

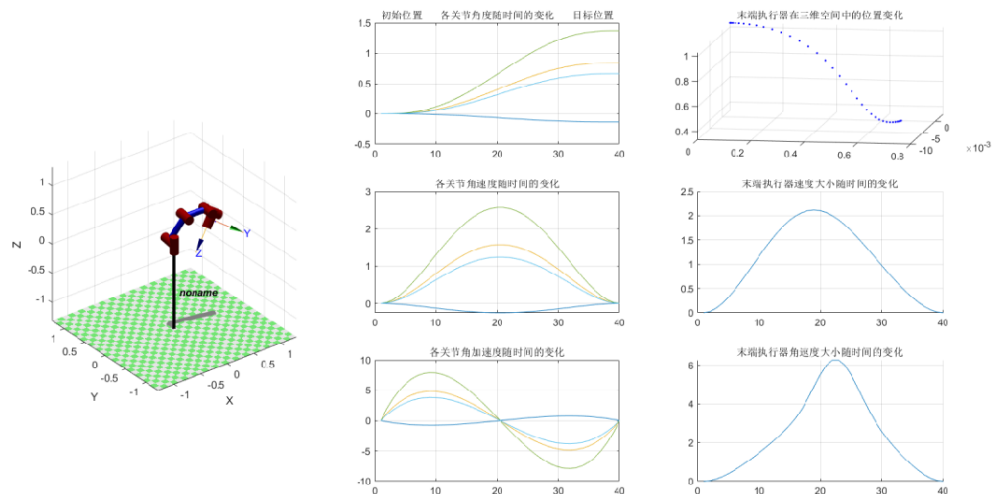


图 3-4 运动学控制

### 3.3 动力学仿真

依据机械臂的 urdf 文件, 可以读取待解机械臂的动力学参数, 部分代码如下, 全部代码见附件:

```
</link>
<link
  name "link1">
  <inertial>
    <origin
      xyz="-0.000702283094909934 0.00590592150487349 0.00527627550511194"
      rpy "0 0 0" />
    <mass
      value="4.68588968879731" />
    <inertia
      ixx="0.0116186426121114"
      ixy "0.000186509810625747"
      ixz " 1.73730946268146E 05"
      iyy="0.0100722938306452"
      iyz="0.000146010674524038"
      izz="0.0131906338879702" />
    </inertial>
```

图 3-5 部分动力学参数求解代码

分别设置机械臂控制方式为力矩控制, 为了实现反馈控制, 需要利用传感器传感出各关节的姿态, 速度, 加速度信号。

Properties	
+ Limits	
- Actuation	
Torque	Provided by Input
Motion	Automatically Computed
- Sensing	
Position	<input checked="" type="checkbox"/>
Velocity	<input checked="" type="checkbox"/>
Acceleration	<input checked="" type="checkbox"/>
Actuator Torque	<input type="checkbox"/>
Lower-Limit Torque	<input type="checkbox"/>
Upper-Limit Torque	<input type="checkbox"/>

同时将如下机械臂模型整合为子系统，以便于控制系统的设计。

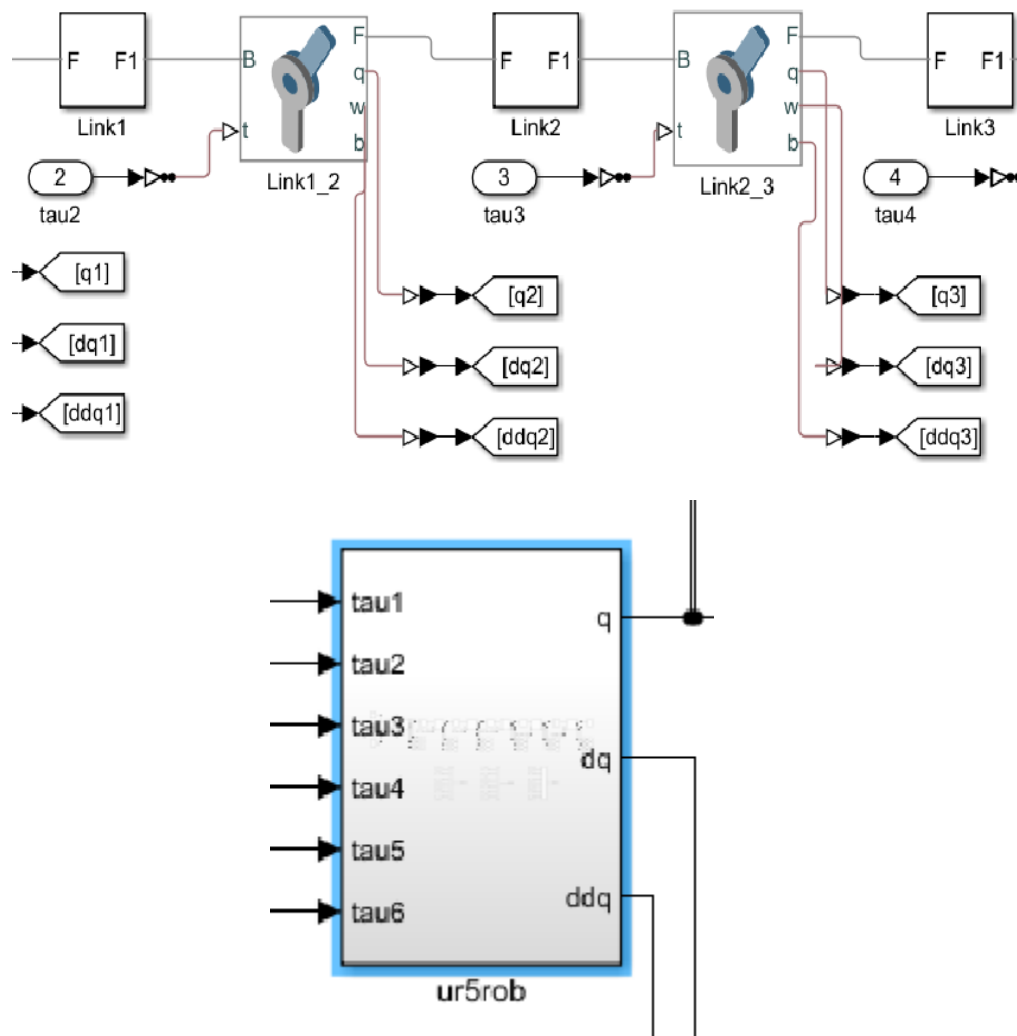


图 3-6 将机械臂封装为子系统

基于牛顿-欧拉方法，将机械臂的逆动力学模型编写为可以带入 Simulink 中进行运算的模块：

```
% 外推
for i=1:6 %matlab下标从1开始
    w[i+1]=R[i].'*w[i]+dq[i+1];
    dw[i+1]=R[i].'*dw[i]+cross(R[i].'*w[i], dq[i+1])+ddq[i+1];

    dv[i+1]=R[i].'* (cross(dw[i], p[i])+cross(w[i], cross(w[i], p[i]))+dv[i]);
    dvc[i+1]=cross(dw[i+1], pc[i+1])+cross(w[i+1], cross(w[i+1], pc[i+1]))+dv[i+1];

    F[i+1]=m[i+1]*dvc[i+1];
    N[i+1]=I[i+1]*dw[i+1] + cross(w[i+1], I[i+1]*w[i+1]);
end
```



```
% 内推
]for i=7:-1:2
    f{i}=R{i}*f{i+1}+F{i};
    n{i}=N{i}+R{i}*n{i+1}+cross(pc{i},F{i})+cross(p{i},R{i}*f{i+1});
-end
```

图 3-7 牛顿-欧拉内推外推代码实现

### 3.4 轨迹规划

由标准拉格朗日方程可知，机械臂的动力学模型总可以写成如下形式：

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + K(q) + G(q) = \tau$$

其中， $M(q)$ 表示机械臂的质量矩阵， $C(q, \dot{q})$ 表示机械臂的离心力与科氏力项， $K(q)$ 表示机械臂的刚度矩阵， $G(q)$ 表示机械臂所受的重力。

基于上述动力学方程，可以设计如下 PID 控制律：

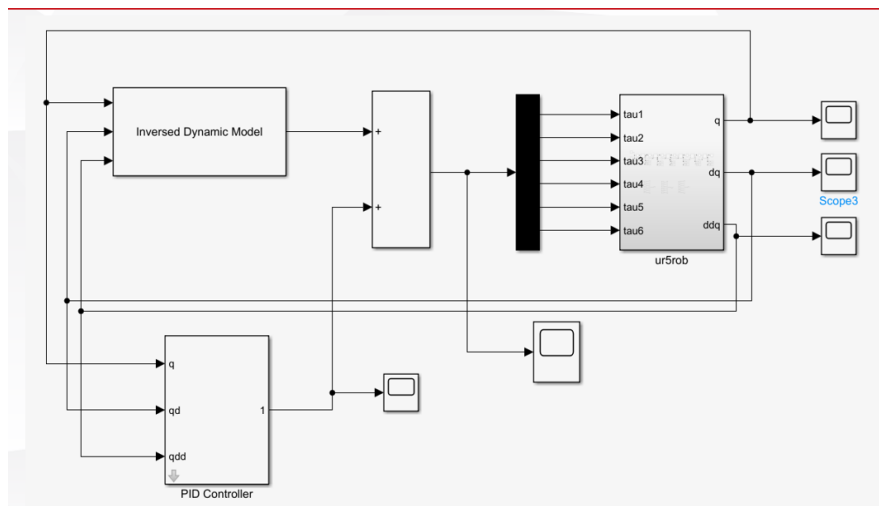
$$\tau = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + K(q) + G(q) + (\ddot{q}_d - \ddot{q}) + K_d(\dot{q}_d - \dot{q}) + K_p(q_d - q)$$

代入拉格朗日方程，可得

$$(\ddot{q}_d - \ddot{q}) + K_d(\dot{q}_d - \dot{q}) + K_p(q_d - q) = 0$$

因此，总可以设计合适的  $K_d$  与  $K_p$ ，使得机械臂构型通过 PID 控制最终收敛到预设构型。

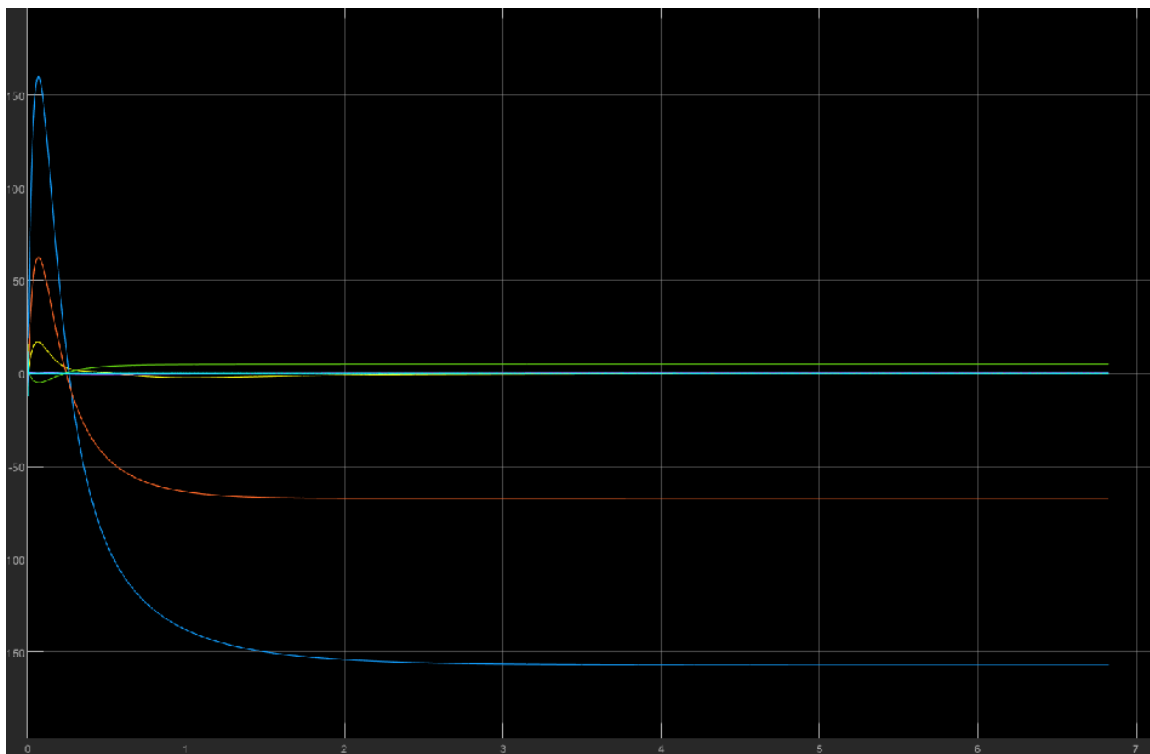
利用 simulink，得到如下控制器模型：



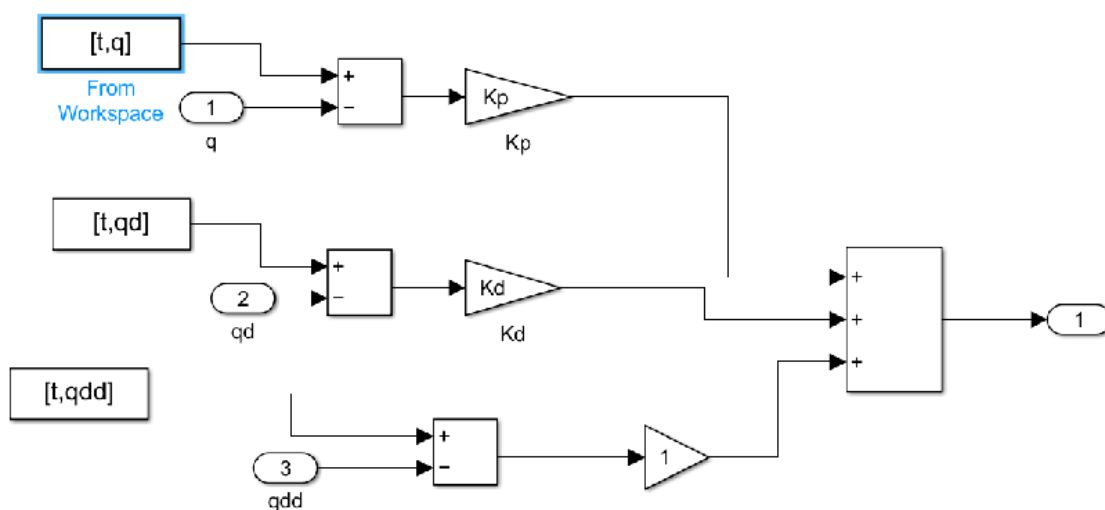
在本项目中，对比了欠阻尼模型与过阻尼模型对机械臂的控制效果。

欠阻尼模型存在比较大的超调与较大的振动，在 6s 时收敛，不利于实际生产。过阻尼模型在 2s 时间内收敛，并且启动，终止平稳，是一种较好的控制方式。

过阻尼系统在 3s 时收敛到预期构型，力矩响应迅速：



轨迹规划问题也可以用基于逆动力学反馈线性化控制器实现，将由逆运动学求解得到的轨迹编写成一个采样时间为 0.025s 的阶跃响应信号，每 0.025s 采样一个向量作为期望位姿输入控制器中，以期实现轨迹跟踪。



Data:

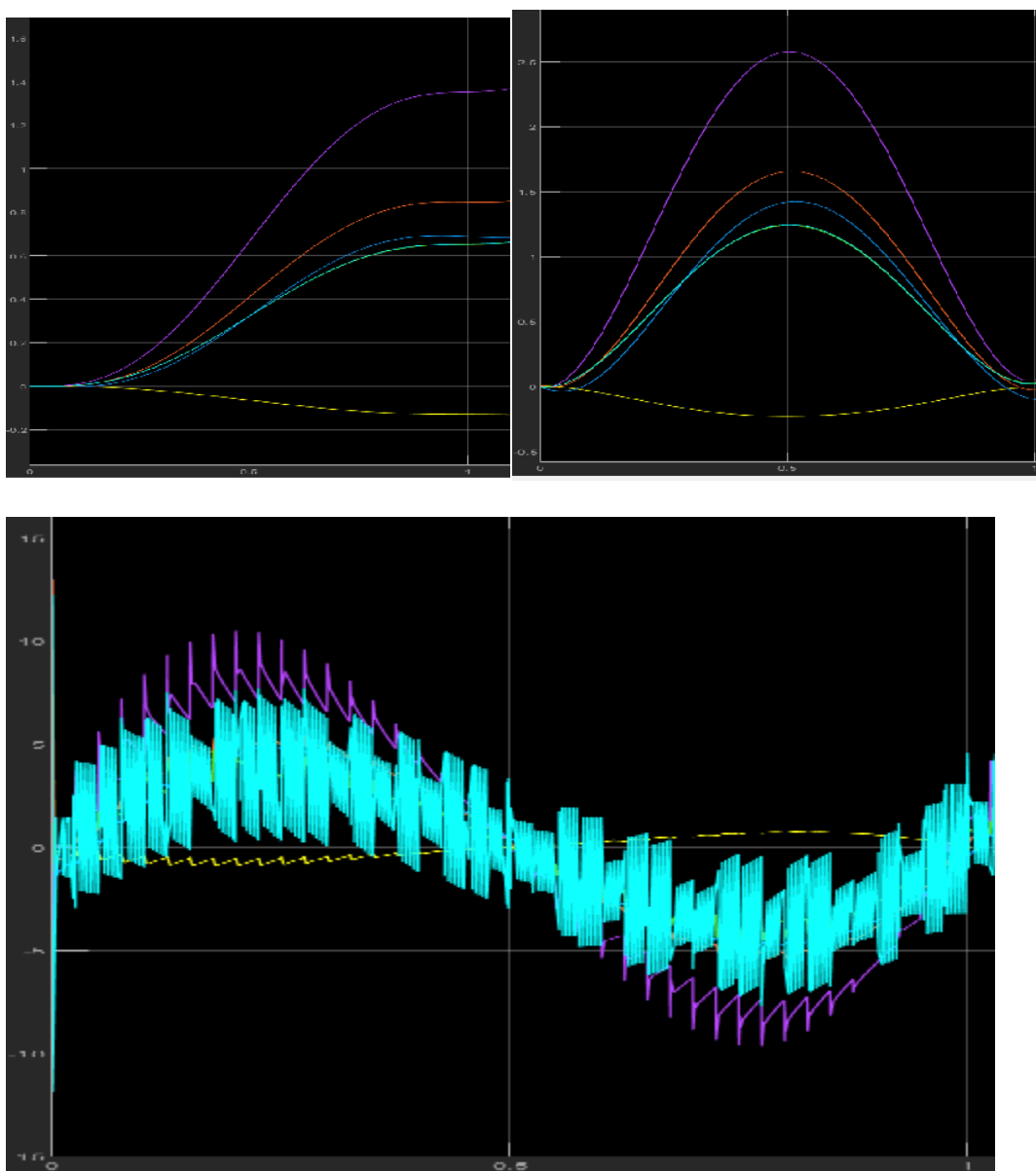
[t, qdd]

Output data type: Inherit: auto

Sample time (-1 for inherited):

1/40

可以看到，除了加速度曲线存在比较大的抖动，构型曲线以及速度曲线都与运动学仿真得到的结果一致，加速度曲线的中心线曲线近似接近于运动学仿真的结果。



## 第五章 结论与展望

多自由度机械臂是一种应用广泛的实用性机器人，在搬运堆叠、自动装配、特种焊接、自动喷涂等工业环境中有着广阔的应用。本次大作业对六自由度机械臂的设计、运动状态仿真和运动学正逆解等方面内容进行了探讨。

本次研究具有较强的理论意义：六自由度机械臂相对于典型固化机械臂巨大优势的同时，实际应用中也存在诸多不便之处，例如解的优化、控制、路线规划和解决方案选择等等。因此，研究六自由度机械臂的行动轨迹规律等内容有着非常重要的意义。同时也有着很强的应用价值：工程应用中，六自由度机械臂具备自重轻、运行效率高、空间越障能力强、作业区间范围大等特性。研究对于我国的工业发展以及各种类的机械臂运用，并运用课程知识给出了我们小组的思考和回答。

## 第六章 项目总结及致谢

在本次项目中，小组成员从国内外协作机器人的研究与发展现状调研开始，进行了六自由度机械臂的模型设计、运动学求解与仿真、动力学仿真、轨迹规划等工作，在了解六自由度机械臂性质的同时，巩固课堂所学，将课本知识应用于实际，进行了一系列极具理论意义和应用价值的研究。

同时十分感谢吴建华老师、熊振华老师、廖梓轩学长对本小组的悉心指导，让我们顺利完成了本次项目。

## 5.1 会议记录



详见附件：

✓	W	会议记录0419.docx	2022-04-19 16:58   黄子云	95.22 KB
✓	W	会议记录 0429.docx	2022-04-29 13:22   何志轩	15.00 KB

## 5.2 人员分工

□	负责人	A 任务名称	★ 优先级	123 周数	■ 状态	进度	任务结果
1	刘杰学	项目开题,思路确定,收集资料	★★★★★	9	已完成	100%	
2	方胜伟	完成论文背景部分	★★★★☆	9	已完成	100%	
3	彭湛轩	matlab仿真搭建	★★★★★	10	已完成	100%	
4	彭湛轩	借鉴模型:安川、ABB六轴机...	★★★★★	10	已完成	100%	
5	何志轩	借鉴模型:发那科	★★★★★	10	已完成	100%	
6	刘杰学	三大官网,UR3机械臂	★★★★★	10	已完成	100%	
7	黄子云	借鉴模型:IAKA 7u	★★★★★	10	已完成	100%	
8	郭灵岚	借鉴模型:新松GCR5 010+换...	★★★★★	10	已完成	100%	
9	黄子云	会议记录	★★★★☆	10	已完成	100%	
23	彭湛轩	运动学检验,走线和精度分析	★★★★★	14	已完成		
24	郭灵岚	电机控制	★★★★☆	14	已完成		
25	郭灵岚	电机参数确定	★★★★☆	14	已完成		
26	何志轩	模型优化	★★★★★	15	已完成		
27	黄子云 方胜伟	报告完善	★★★★☆	15	已完成		
28	刘杰学	答辩ppt	★★★★☆	15	已完成		
29	彭湛轩	动力学仿真:已知运动轨迹	★★★★★	15	已完成		
30	彭湛轩	运动学仿真:电机的力矩和电压...	★★★★★	15	已完成		
31	全组	合作虽止,友谊长存!	★★★★★		进行中		

## 参考文献

### 1. JAKA Zu 5

JAKA Zu 系列协作机器人是节卡公司目前研究较为成熟，市场应用较为广泛的机械臂系列，由六个旋转关节构成。以 JAKA Zu 5（如图 1 所示）为例，其产品特点包括：小巧轻便，自重 23Kg，最大负载 5Kg，工作半径达到 954mm；灵活性高，可快速部署，节省员工工作时间，优化整体生产率；适应性强，满足轻量化的作业需求，如上下料、测试、装配等。广泛应用于 3C 电子、精密制造、教育、服务等行业。



图 1 JAKA Zu 5 机械臂

### 2. 发那科 M-20iA/20M

发那科创立自 1974 年，公司主营业务为集成视觉系统的机器人。发那科机器人产品以协作机器人和系列为主，负载覆盖 0.5kg 到 2300kg。

CR/CRX 系列 6 轴协作机器人具有安全性高、柔性灵活、与人协作等特点，应用于智能、柔性制造流程。以 CRX-10iA 为例，其自重为 40kg，可用负载为 10kg，可达半径为 1249mm；机械臂末端最高速度在协同模式下可达 1m/s，在高速模式下可达 2m/s，重复定位精度达到 $\pm 0.04\text{mm}$ ；



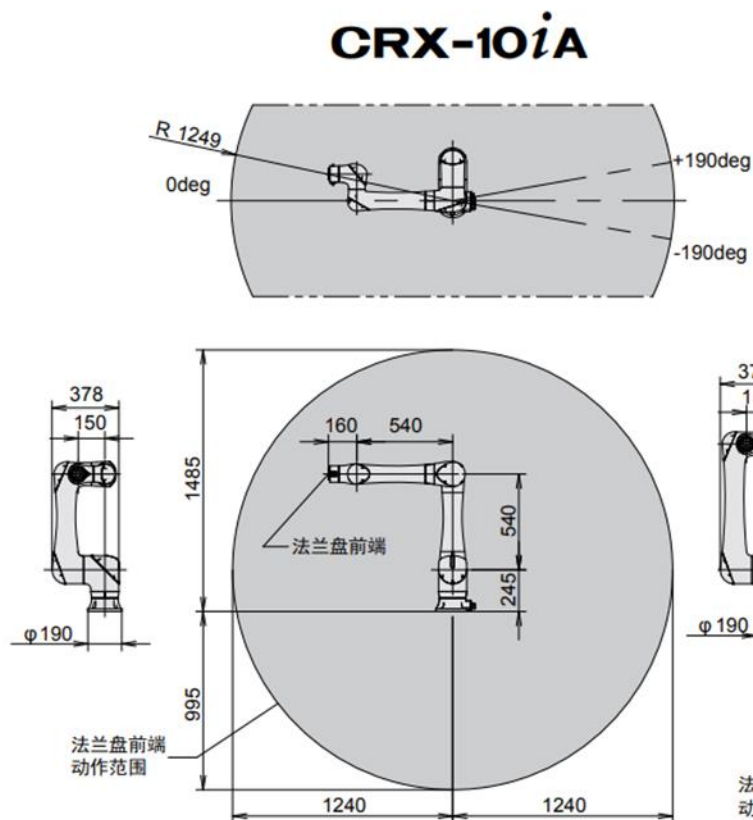


图-2 CRX-10iA 机器人

## 规格

机 型	CRX-10iA	CRX-10iA/L
控制轴数	6轴 (J1、J2、J3、J4、J5、J6)	
可达半径	1249 mm	1418 mm
安装方式 (注释1)	地面安装、顶吊安装、倾斜角安装	
动作范围 (最高速度) (注释2)	J1轴	380° (120°/s) 6.63 rad (2.09 rad/s)
	J2轴	360° (120°/s) 6.28 rad (2.09 rad/s)
	J3轴	570° (180°/s) 9.95 rad (3.14 rad/s)
	J4轴	380° (180°/s) 6.63 rad (3.14 rad/s)
	J5轴	360° (180°/s) 6.28 rad (3.14 rad/s)
	J6轴	450° (180°/s) 7.85 rad (3.14 rad/s)
最高速度 (注释2,3)	协同模式	1000 mm/s
	高速模式	2000 mm/s
手腕部可搬运质量	10 kg	
手腕允许负载转矩	J4轴	34.8 Nm
	J5轴	26.0 Nm
	J6轴	11.0 Nm
手腕允许负载 转动惯量	J4轴	1.28 kg·m <sup>2</sup>
	J5轴	0.90 kg·m <sup>2</sup>
	J6轴	0.30 kg·m <sup>2</sup>
重复定位精度 (注释4)	± 0.04 mm	
机器人质量 (注释5)	40 kg	
安装条件	环境温度: 0 ~ 45℃	
	环境湿度: 通常在75%RH以下(无结露现象)	
控制装置 R-307B Mini Plus	电源	AC 100 ~ 120V、AC200 ~ 240V 单相, 50/60Hz
	质量	20 kg
	尺寸(宽×深×高)	410×277×370 mm
	防护等级	IP54
噪声 (注释6)	70 dB以下	

注释1) 倾斜角安装时,根据负载质量的不同,动作范围受到限制。

注释3) 需根据系统的风险评估来确定动作速度。

注释5) 不包含控制装置的质量。

注释6) 该值是根据ISO11201 (EN31201) 标准测量的A载荷等效噪声级别。测量按照以下条件进行。—最大负载、最高速度、自动运行 (AUTO模式)

注释2) 短距离移动时有可能达不到最高速度。

注释4) 符合ISO9283标准。

图-3 CRX-10iA 机器人技术参数

M 系列机器人是发那科的 6 轴小型机器人产品，负载质量在 7-35kg 之间，内置视觉功能/力传感器，有方便进行电缆布置的中空手腕机型和用于搬运大型工件的高容许转动惯量手腕机型；以代表型号 M-20iA 为例，其自重为 250kg，可用载荷上限为 20kg，可达半径为 1811mm，可采用地面安装、顶吊安装和倾斜角安装三种方式进行安装，重复定位精度达到 $\pm 0.03\text{mm}$ 。

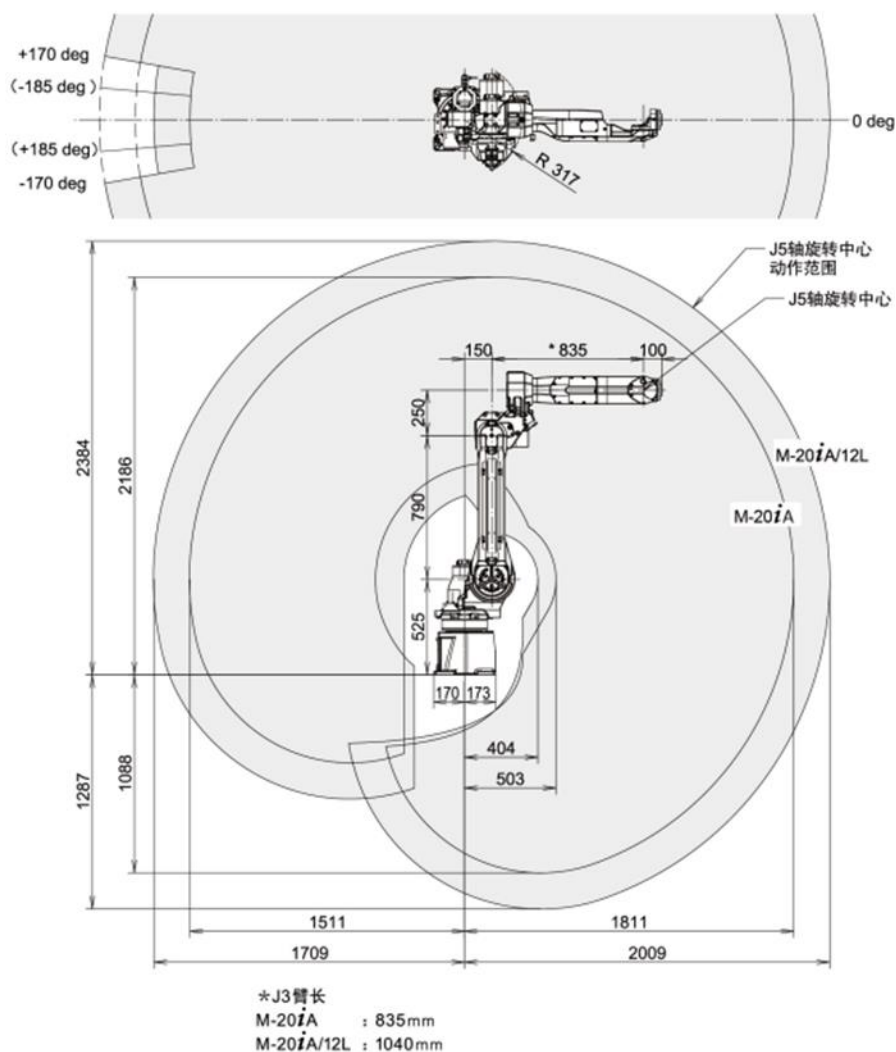


图-4 M-20iA 机器人

### 3. 安川、ABB 六轴机械臂

安川以及 ABB 公司主打的机械臂产品为主流产品为垂直多关节型机器人，或称六轴机械臂。



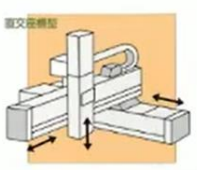
结构	垂直多关节型机器人	水平多关节型机器人	直行坐标式机器人
			
可搬质量	1kg~600kg都能应付 (根据我司的机器人系列)	小容量	小容量
轴数	4~7轴	4轴	2~3轴
速度	○	◎	◎
定位精度	○	◎	◎
动作的灵活度	○	×	×
动作示教	示教再现方式	数值控制方式	数值控制方式
系统设计	◎ (只设计前端夹具)	○ (只设计前端夹具)	× (包括搬运部分在内的设计)
使用用途	焊接、搬运、组装、喷涂等 各种各样的用途中使用	电子零件的组装、小物件的搬运 等用途为主	切割、组装等

图-5 安川主流机械臂产品

IRB 系列六轴多关节机器人是 ABB 公司工业机器人的代表产品，以 IRB140 六轴多用途机器人为例，其自重为 98kg，有效载荷为 6kg，可达范围为 810mm；IRB140 有多种安装方式可选，可用于弧焊、装配、清理/喷雾、上下料、物料搬运、包装、去毛刺等工作。

Dimensions IRB 140

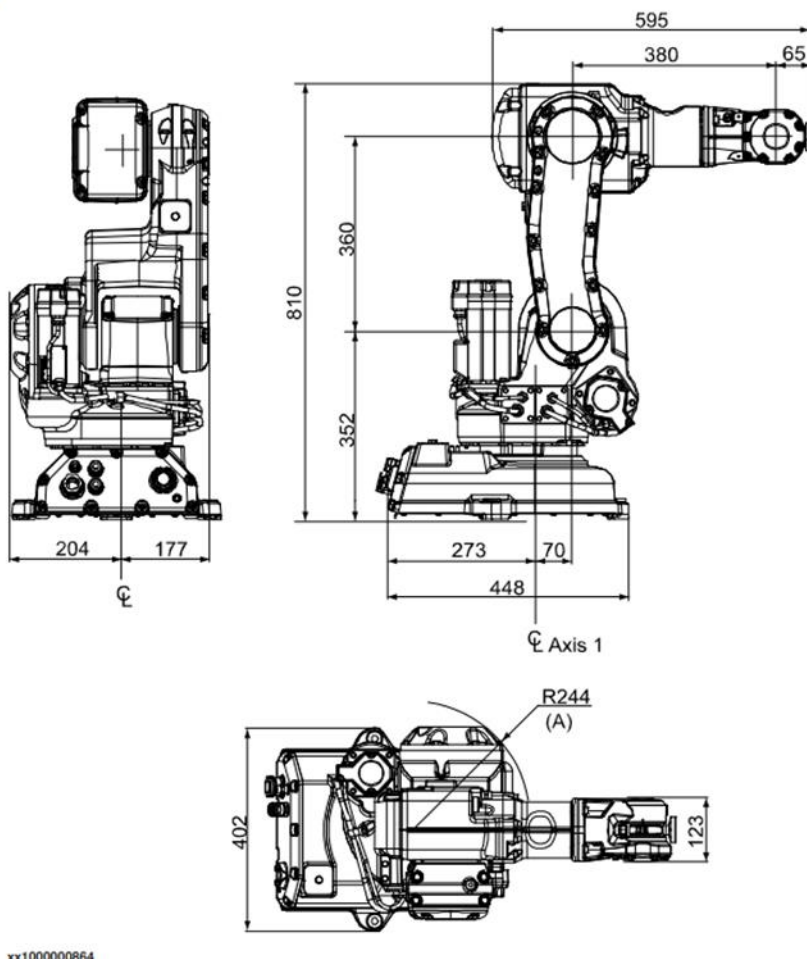


图-6 IRB 140 六轴多用途机器人

## 4. 新松 GCR5-910 协作机器人、埃夫特 ECR5 协作机器人

### 4.1 新松 GCR5-910 协作机器人

#### 4.1.1 描述:

GCR5-910，高性价比的全新通用型协作机器人，具有轻量级、快速部署、操作简易、安全、节能等显著特点，是实现工厂高效低成本运作的理想选择。



#### 4.1.2 产品特点:

1. 重量 21kg, 可快速部署/切换, 可任意姿态安装
2. 碰撞检测, 灵敏度可调
3. 易编程-牵引示教
4. 200W 低能耗, 投资回报率高

#### 4.1.3 基本参数:

最大负载	5KG
自由度	6
关节旋转角度	±360度
重复定位精度	±0.03mm
工作空间	917mm
末端最大直线速度	1.5m/s
末端最大速度	3.6m/s
工具接口	GB/T 14468.1-50-4-M6 (EQV ISO 9409-1)
电源	230VAC (-15%~+10%), 50-60HZ
功耗	典型工况约200W
安装方式	置地式、倒挂式、悬臂式
机器人外形尺寸	1100mm X 330mm X 200 mm
控制柜尺寸	530mm X 480mm X 180 mm
环境温度	-10°C - 45°C
存储温度	-40°C-55°C
IP等级	IP54
机器人净重	22KG

#### 4.1.4 SolidWorks 建模

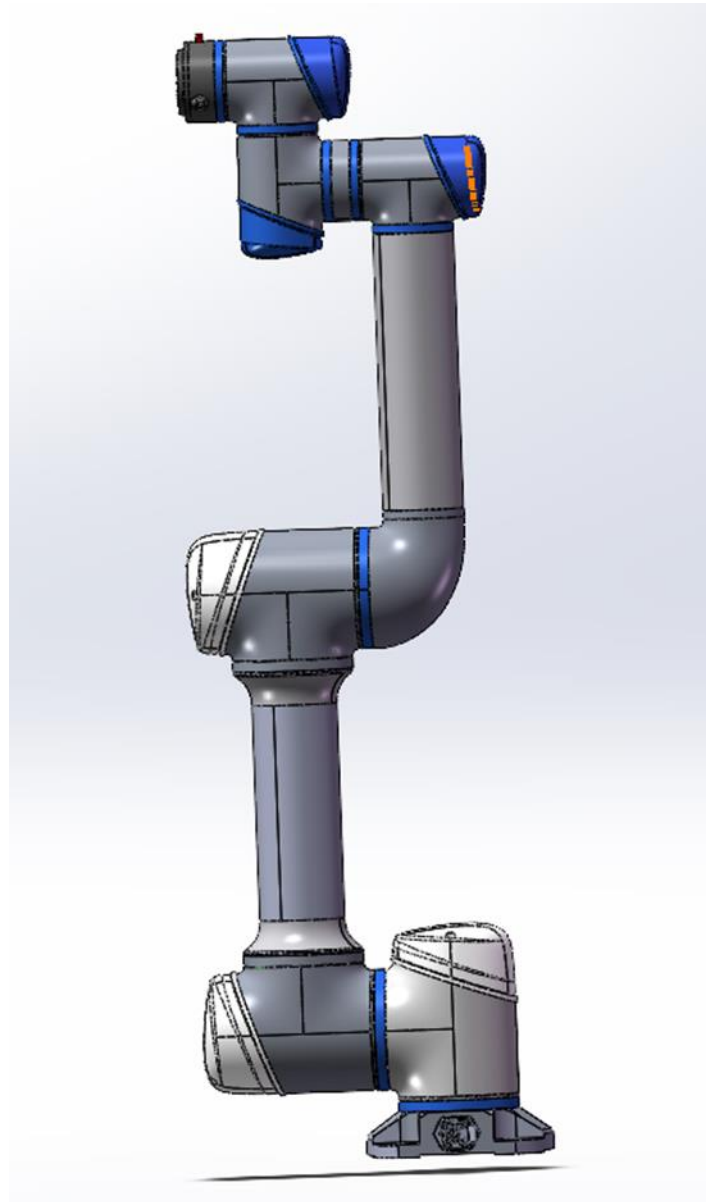


图 1-1 SolidWorks 建模

SolidWorks 建模见附件

## 4.2 埃夫特 ECR5 协作机器人



#### 4.2.1 描述:

ECR5 协作机器人是埃夫特自主开发的一款六轴协作机器人，有效负载 5kg，工作范围 928mm，机械臂自重 20kg。末端功能按键简化操作，末端运行速度达 2.8m/s，重复定位精度 $\pm 0.03\text{mm}$ 。





#### 4.2.2 产品特点:

ECR5 协作机器人具有四大差异化价值点:

1) 安全——本体设计采用全圆弧无棱角设计方案,亲和友好;电气系统设计,保障常规安全;灵敏的碰撞检测功能,碰撞检测等级可设置,非预期碰撞自动停止,保障人、机、设备安全;控制系统多重安全设计,保证上层安全;驱动软、硬件设计多种安全保护,扎牢底层安全防线

2) 易用——灵敏的拖动示教功能,末端按键操作实用,拖动轨迹完美复现;HMI界面简洁明快,3步可达;图形引导编程,简单易用;3D虚拟现实,所见即所得

3) 高效——末端速度达 2.8m/s,运行效率高,轨迹柔顺,动作连贯;碰撞检

测阈值可调，兼顾安全与效率；传承工艺包，快速部署，灵活换线，快速回本

4) 开放——末端工具接口通用、支持通信协议，控制柜体简洁开放，控制系统功能库完整、支持二次开发；示教器接口开放，支持第三方定制 HMI；支持 ROS 机器人操作系统，科研与教学领域广泛使用

### 4.2.3 产品参数:

产品参数 / SPECIFICATIONS		
型号	ECR5	
机构	多关节型协作机器人	
轴数	6轴	
手腕部可搬运负载	5 kg	
重复定位精度	± 0.03 mm	
本体重量	20.5 kg	
最大臂展	928 mm	
本体防护等级	IP54	
电柜防护等级	IP40	
驱动方式	使用无框电机进行低压伺服驱动	
安装方式	任意角度	
安装条件	环境温度	0~50 ℃
	环境湿度	通常在5-95%RH以下（无结露现象）
	振动加速度	4.9 m/s²（0.5 G以下）

手腕允许扭矩	J4	19 N.m
	J5	13 N.m
	J6	13 N.m
手腕允许惯性力矩	J4	0.8 kg.m²
	J5	0.4 kg.m²
	J6	0.4 kg.m²
最大单轴速度	J1	150°/sec
	J2	150°/sec
	J3	150°/sec
	J4	180°/sec
	J5	180°/sec
	J6	180°/sec
各轴运动范围	J1	± 180°
	J2	± 180°
	J3	± 160°
	J4	± 180°
	J5	± 180°
	J6	± 360°

附:

