



天津中德应用技术大学  
Tianjin Sino-German University of Applied Sciences

## 毕业设计（论文）

机器人开发平台中工业机器人运动轨迹插补研究

Research on Industrial Robot Motion Trajectory  
Interpolation in Robot Development Platform

姓 名 马学彬

学 院 智能制造学院

专 业 自动化

指导教师 邵欣

职 称 副教授

完成时间 2020.05.20

# 天津中德应用技术大学智能制造学院

## 毕业设计（论文）课题申报表

课题名称	基于机器人开发平台的工业机器人轨迹优化算法研究及其实现		
教师姓名:	邵欣	学生专业	自动化
课题类型	A-生产实践; B-工程设计; C-实验研究; D-理论分析; E-理论应用; <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">F-项目设计</span> ; I-其它_____		
<p>课题说明（意义、目的）：（所填内容格式：小四宋体，20磅行距，字数50~200）</p> <p>工业机器人技术是上个世纪中叶发展起来的一门新兴技术，是集精密化、智能化、柔性化等优点于一体的高新技术，是现代工业自动化技术水平的最高体现，它的发展水平已经成为衡量一个国家工业自动化水平的标志。六自由工业机器人一种典型的工业机器人，它有六个关节，可以到达空间内任意一点，按照特定的轨迹路线完成相应的工作任务。</p>			
<p>课题主要内容：（所填内容格式：小四宋体，20磅行距，字数150~300）</p> <p>本课题的主要工作和成果如下：首先在安川 SK6 六自由度机器人模型的基础上，采用 D-H 法建立坐标系，对机器人运动学方程理论进行深入研究，建立齐次变换矩阵，推导机器人正解公式，并采用分离变量法解决运动学中的逆解问题，通过仿真实验进行误差验证。然后，深入研究非均匀有理 B 样条曲线（NURBS）理论，采用 de Boor 算法快速计算曲线上的点和导矢。在研究分析当前 NURBS 曲线插补算法的基础上，提出了基于 de Boor 算法的 NURBS 曲线实时变步长插补算法，在这种算法下插补步长可以根据误差的大小和曲率的改变进行自动调整：在曲率大的线段减小步长，提高精度，在曲率小的曲线段增大步长，提高速度，以此来同时满足精度和速度的要求。</p>			
完成该课题是否需要耗材： <input type="checkbox"/> 是 <input checked="" type="checkbox"/> 否 主要耗材和预计资金：			
课题预计成果： 毕业论文一篇			
毕业设计指导意见： <div style="text-align: center; margin-top: 20px;"> <span style="font-size: 1.5em; font-family: cursive;">同意课题申报</span> </div> <div style="text-align: right; margin-top: 20px;">                     盖章（签字） <span style="border: 1px solid red; padding: 2px 5px; color: red;">李云龙</span> </div>			

## 天津中德应用技术大学毕业设计（论文）任务书

题目	基于机器人开发平台的工业机器人轨迹优化算法研究及其实现				
学生姓名	马学彬	院（系）名称	智能制造学院	专业班级	16 自动化 3 班
课题类型	项目设计				
课题意义	<p>工业机器人与传统人工技术相比具有显著的优势，而我国工业机器人技术水平与世界一流水平相比还有较大差距。因此对于工业机器人的研究尤其是对其控制技术的研究，十分有利于提高我国机器人技术水平及加快我国自动化产业进程。考虑到国外焊接机器人引进成本高、程序编写复杂，而国内焊接机器人运动过程中轨迹及加减速度不易控制，利用插补运动并结合实际工艺需求选择相关改进算法，能够有效优化轨迹运动过程。此外，针对当前机器人可控制系统开放性、兼容性欠缺，操作人员对机器二次开发困难的问题，本课题选择了开放式可重构机器人开发平台。</p>				
任务要求	<p>基于 otostudio 等软件，对工业机器人运动轨迹的插补算法进行分析研究，任务要求如下：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 研究机器人运动学方程理论，推导机器人正解公式。</li> <li>2. 解决运动学中相关逆解问题。</li> <li>3. 计算机器人运动曲线上的点和导矢，并分析研究主要曲线插补算法。</li> <li>4. 通过仿真实验验证误差。</li> <li>5. 根据任务情况完成毕业论文的撰写。</li> </ol>				
推荐参考资料	<p>[1]王强. 六自由度工业机器人的运动轨迹插补算法的研究[D]. 浙江工业大学, 2012.</p> <p>[2]岳晴晴. 六轴工业机器人轨迹规划的研究[D]. 江苏科技大学, 2019.</p> <p>[3]徐元凡, 刘日良, 张承瑞, 王科. NURBS 曲线插补技术研究[J]. 现代制造工程, 2009(03):9-12.</p> <p>[4]余晓菁. 工业机器人运动规划与样条插补方法研究[D]. 华中科技大学, 2017</p>				
起止日期	2019 年 12 月 16 日-2020 年 5 月 15 日				
备注					

指导教师:   郑欣        教研室（系）主任:   范其明        主管院长:   王秀敏

# 天津中德应用技术大学

## 毕业设计（论文）开题报告表

姓名	马学彬	学院（系）	智能制造学院	专业班级	16 自动化 3 班
题目	基于机器人开发平台的工业机器人 轨迹优化算法研究及其实现			指导教师	邵欣
一、与本课题有关的国内外研究（应用）情况、课题的目的、意义及主要内容 见附页					
二、进度及预期结果					
起止日期	主要内容			预期结果	
2019.12.16- 2020.1.19	通过知网以及图书馆等搜集查阅相关文献资料			确定课题研究方向以及相关重难点问题	
2020.1.20-4.10	编写课题相关程序，调试运行修改程序			完成程序设计	
2020.4.11-4.30	仿真运行验证误差，撰写论文			完成仿真实验以及论文的初步撰写	
2020.5.1-5.15	完成论文定稿			完成课题论文	
完成课题的 现有条件	机器人开发平台、 Otostudio 开发软件 计算机				
审查意见	<p style="text-align: center;">论文选题难度适中，具有较强的应用价值，实验条件具备，学生也阅读了较多的相关文献，也具有一定的技术实现能力，对毕业设计的主要内容把握较为准确。综上，同意开题。</p> <p style="text-align: right;">指导教师： <u>邵欣</u>      2020年 <u>1</u> 月 <u>10</u> 日</p>				
学院（系） 意见	<p style="text-align: center;"><u>同意</u></p> <p style="text-align: right;">主管领导： <u>王庆</u>      2020年 <u>2</u> 月 <u>28</u> 日</p>				

## 1. 研究的目的及意义

工业机器人是一种集多种学科先进技术于一体的智能化设备,其具有以下几个优点<sup>[1-3]</sup>: 1.可以减少危险环境及工作对人身的伤害 2.能够提高对工件加工的精度和速度 3.能够减轻人力劳动强度,提高工作效率 4.提高工业生产自动化程度。由此对工业机器人控制技术的研究对加快自动化进程具有重要意义。而机器人的运动轨迹直接影响着控制的准确性和快速性。如对于一些工作任务(电弧焊、电切割、喷涂等),我们不仅需要机器人在运动终点准确定位,还需要其沿着所希望的路径在一定的误差范围内运动<sup>[4-5]</sup>,因此本项目利用插补运动并结合实际工艺需求选择相关改进算法,进而有效优化工业机器人轨迹运动过程。

控制程序在机器人运动控制系统中是十分重要的,但其插补法和速度控制更是衡量机器人运动准确性快速性的重要依据,尤其是插补法,更是运动控制器的核心模块,可以这样理解,没有插补法就无法加工出零件的轮廓。插补法同样也是影响整个系统精度的重要因素之一,因此本课题将通过建立坐标系,坐标系运动并结合相关算法等来描绘机器人的插补运动。

## 2. 国内外研究的历史和现状(文献综述)

在现有的机器人控制系统上,主要以直线插补和圆弧插补等为主要插补算法。对于一些简单的工件,用户只需要示教两三个(直线插补需两个点,圆弧插补较为复杂需要三个点)点即可使机器人按照设定的路线进行运动。但随着科学技术的不断更新进步,工件的复杂度越来越高,人们对机器人的轨迹要求越来越精确,采用简单的直线和圆弧的轨迹拼接近似是目前常用方法,但是此法会导致示教工作量的增加且不能够保证轨迹的精确性<sup>[6-7]</sup>。B样条曲线是表述空间曲线的一种方法,可以只通过几个特征示教点拟合出相应的轨迹,目前较符合工业生产的要求。<sup>[8-9]</sup>

B样条曲线属于基于参数曲线的插补算法,基于参数曲线的插补算法是采用参数曲线做数学模型实现数据点的密集化计算,由于其形状表现能力很好,形状控制能力很强,其已经成为国际标准化组织规定的CAD/CAM的数据交换标准。在此标准下,基于参数曲线的插补算法成为插补技术研究的重点方向之一。B样条曲线于1972年提出,它因为具有局部修改性、逼近特征多边形的更高精度性,多边形的边数与基函数的次数无关等优点而被广泛应用<sup>[10-11]</sup>。像西门子,三菱等

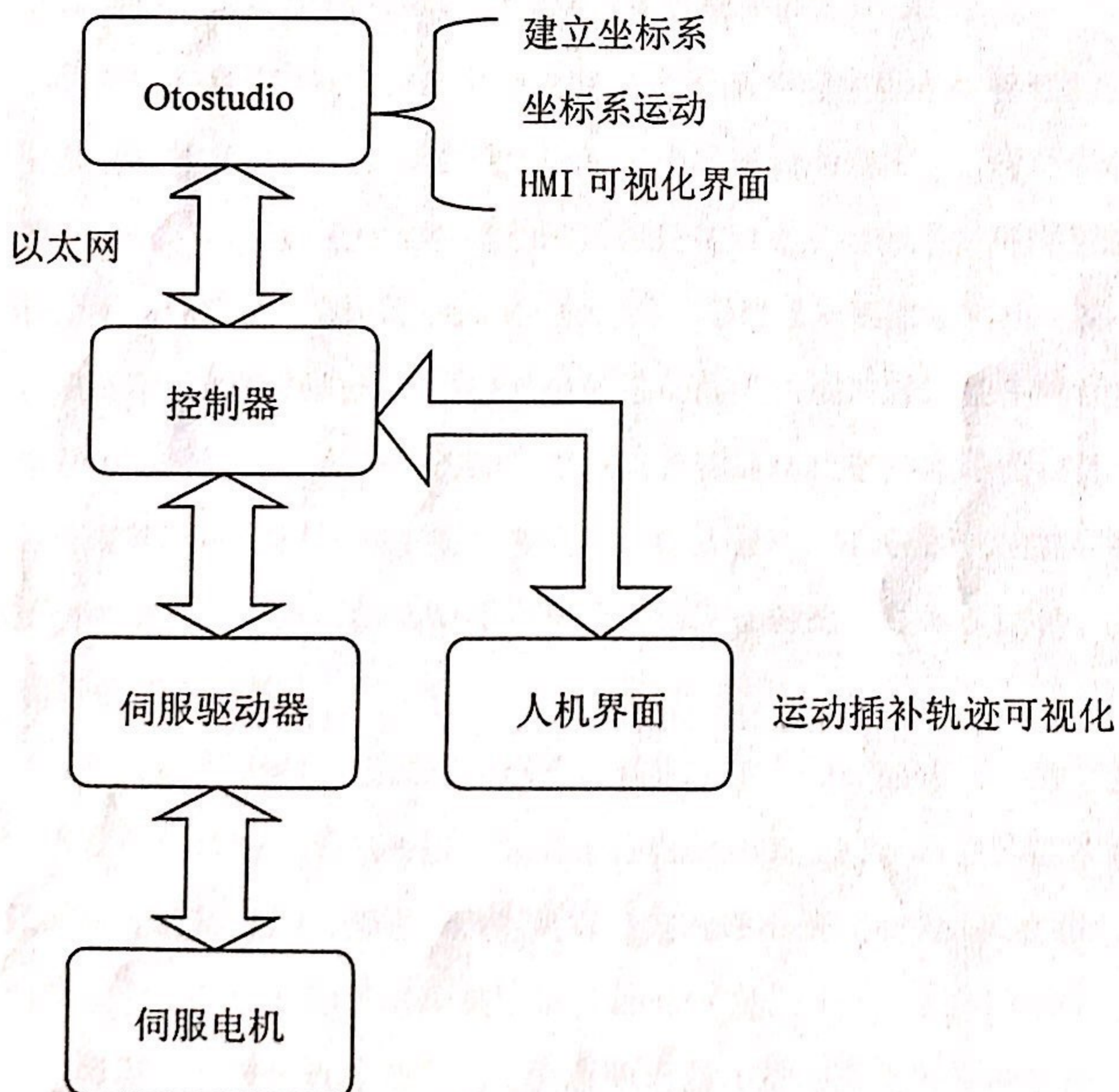
企业都已经研发了基于参数曲线插补算法的高端设备，国内的华中数控等企业的设备也具有基于参数曲线的插补功能但较国外著名企业而言，还是具有一定的差距，功能上也不够完善。

### 3. 主要研究内容

基本思路：

1. 查阅搜集相关资料，了解插补的定义以及相关应用。
2. 查阅相关文献，构思毕设整体结构流程。
3. 了解机器人开发平台相关知识，进行基础性学习开发与应用。
4. 在机器人开发平台中构建坐标系，进行坐标系运动的设计等研究。
5. 在软件开发平台进行软件编程，并进行调试修改。
6. 进行 HMI 可视化界面的设计，使运动插补轨迹可视化。

框架：



### 主要研究方式:

插补是一个实时将数据进行密化的过程,其原理基本上是将采集到的数据信息与给定的信息进行数字计算,通过数字计算不断调整各个执行部件的协调运动,从而使被控机械部件按照设定的理想路线或速度等进行运动。插补技术不论是以何种方式实现,内在的核心都是插补算法的设计。因此,本课题利用插补运动并结合实际工艺需求选择相关改进算法,进而有效优化轨迹运动过程。本课题将采用 Otostudio 开发软件进行插补算法的设计及实现, Otostudio 编程软件是基于 IEC61131-3 工业控制语言的组态软件,标准的编程工具,其具有开放性、扩展性、灵活性、模块化等特点,能够满足本课题的需求。

本课题将首先对机器人开发平台的软硬件架构进行阐述,明确机器人开发平台所具有的优势以及其所能为本项目的开展所提供的便利。从而为本项目的开展提供设备上的保障。后将对插补算法进行理论推导并通过 MATLAB 软件对算法进行仿真分析,从而为项目的开展提供理论上的支撑。

本课题将在 Otostudio 软件上进行坐标系的建立以及坐标系的运动。在运动控制器初始状态下,所有的规划轴都处于单轴运动模式下,两个坐标系也是无效的。所以,当需要进行插补运动时,首先需要建立坐标系,将规划轴映射到相应的坐标系中。本课题可选用二维(X-Y)、三维(X-Y-Z)、四维(X-Y-Z-A)坐标系描述运动的插补轨迹。后将结合所选的改进算法,对运动控制程序进行设计,同时为了更加便于对电机的控制以及对各轴运动状态的监测而设计可视化界面。运动控制程序的设计将主要围绕直线、圆弧插补,并将设计跟踪误差的检测以及自动误差补偿,最后将实验结果与仿真结果相对比,并得出结论。

#### 4. 课题的准备情况

指导教师和学生通过双向选择,确定了毕业设计(论文)题目及研究方向,并下发了任务书。学生根据任务书进行自行查阅资料,熟悉设备基本功能,并对课题研究进行整体的构思。学生具有一定的理论研究能力,具备编程解决实际问题的能力,并已开始搜集相关文献并展开研究。

机器人开发平台由控制器,伺服驱动器以及伺服电机等等组成,能够模拟六轴机器人的各个关节的运动,为我们对机器人运动轨迹插补的研究提供了必要的设备基础。Otostudio 软件支持六种编程语言,结构文本(ST)、指令表(IL)、

顺序流程图 (SFC)、功能块图 (FBD)、梯形图 (LD)、连续功能编辑器 (CFC), 为我们进行插补算法的设计提供了编程语言上的便利, 且通过课堂上老师的讲解以及课下自我的摸索, 对 Otostudio 软件使用较为熟练。本软件提供每个坐标系两个缓存区 (FIFO0、FIFO1), 每个 FIFO 包含有 4096 段插补数据的空间, 且支持动态管理方式, 即插补数据运动完成之后, 其所占用的缓存区空间将会被释放, 则可以继续传递新的插补数据, 通过这种方式, 就可以支持大于 4096 段的插补数据, 为进行数据的处理提供了可能。

## 5. 参考文献

- [1]王强.六自由度工业机器人的运动轨迹插补算法的研究[D].浙江工业大学,2012.
- [2]戴家鹏.工业机器人在智能制造中的角色[J].Engineering,2018,4(04):27-39.
- [3]Eduardo Nebot. 机器人技术 —— 从自动化到智能系统 [J].Engineering,2018,4(04):40-46.
- [4]岳晴晴.六轴工业机器人轨迹规划的研究[D].江苏科技大学,2019.
- [5]李昌达.工业机器人的运动轨迹规划和轨迹跟踪控制[D].华南理工大学,2018.
- [6]王浩.六自由度切削机器人在复杂曲面加工中轨迹规划研究[D].东北电力大学,2018.
- [7]Wei Chen. A Novel Trajectory Planning Scheme for Spray Painting Robot with Bézier Curves[C]. 东北大学、IEEE 新加坡工业电子分会.第 28 届中国控制与决策会议论文集 (下).东北大学、IEEE 新加坡工业电子分会:《控制与决策》编辑部,2016:1898-1902.
- [8]张悦.工业机器人插补算法及标定技术研究[D].江西理工大学,2017.
- [9]Huan Zhao, LiMin Zhu, Han Ding. A real-time look-ahead interpolation methodology with curvature-continuous B-spline transition scheme for CNC machining of short line segments[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture,2013,65.
- [10]金子舒.基于速度前瞻的 NURBS 曲线插补算法的研究设计[D].哈尔滨工业大学,2018.
- [11]Park J, Nam S, Yang M. Development of a real-time trajectory generator for NURBS interpolation based on the two-stage interpolation method[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2005, 26(4): 359-365.

**天津中德应用技术大学**  
**本科生毕业论文（设计）的声明**

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在指导教师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或没有公开发表的作品内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者签名：马学彬

2020年5月20日

本人声明：该学位论文是本人指导学生完成的研究成果，已经审阅过论文的全部内容，并能够保证题目、关键词、摘要部分中英文内容的一致性和准确性。

学位论文指导教师签名：邵欣

2020年5月20日

## 摘 要

工业机器人在推动我国智能制造业发展升级中扮演着重要角色,其具有传统人工技术无法替代的优势,但我国工业机器人技术起步晚,发展状况不如国外发达国家。在产业升级推动工业机器人朝着开放化发展的背景下,对工业机器人开放式控制系统进行二次开发具有很实用的意义,其中插补运动对机器人运动控制具有极其重要的意义。因此,本项目结合开放式可重构机器人开发平台,通过完成六边形、圆形零件的插补运动,以实现开发平台的二次开发。

本文首先通过分析开发平台的软硬件结构,明确开发平台所具有的优势。然后分析典型插补算法的实现原理,并通过 MATLAB 软件进行仿真验证,为该算法能够较精确控制轴运动提供理论上的依据。最后,进行开发平台系统参数的配置,并结合插补算法与开发平台所提供的点位基础运动模式,使用 Otostudio 软件设计六边形、圆形零件的插补运动控制程序以及人机交互界面。

通过对程序的调试,实现了开发平台直线、圆弧的插补运动,并能够更便捷的通过人机交互界面实现对轴的运动控制及运动状态的监控,为后续曲线、空间插补算法的实现及研究打下基础。

**关键词:** CPAC; Otostudio; 插补; 工业机器人;

## ABSTRACT

Industrial robots play an important role in promoting the development and upgrading of China's smart manufacturing, it has the advantage that traditional manual technology cannot replace, but China's industrial robot technology started late, its development is not as good as the developed countries abroad. Opportunity to promote industrial robots towards open development in industrial upgrading. It has practical significance for the secondary development of the open control system of industrial robots. However, interpolation motion plays an extremely important role in robot motion control. Therefore, this project combined with the open reconfigurable robot development platform, through the completion of the interpolation movement of hexagonal and circular parts, to realize the secondary development of the development platform.

This article first analyzes the software and hardware structure of the development platform to clarify the advantages of the development platform. Then analyze the realization principle of typical interpolation algorithm, Simulation verification through MATLAB software provides a theoretical basis for the algorithm to control the axis motion more accurately. Finally, configure the system parameters of the development platform, and combined with the basic point motion mode and interpolation algorithm provided by the platform, otostudio software is used to design the interpolation motion control program and human-computer interaction interface for hexagon and round parts.

Through the debugging of the program, the linear and circular interpolation motion of the development platform is realized, and it can more conveniently realize the motion control of the axis and the monitoring of the motion state through the human-computer interaction interface. It lays the foundation for the realization and research of subsequent curve and space interpolation algorithms.

**Key words:** CPAC; Otostudio; Interpolation; Industrial robot;

# 目 录

第一章 绪论.....	1
1.1 引言.....	1
1.2 工业机器人的发展现状及发展趋势.....	1
1.2.1 工业机器人发展历程.....	1
1.2.2 国内外工业机器人发展现状.....	2
1.2.3 工业机器人发展趋势.....	3
1.2.4 机器人插补理论.....	4
1.3 本文研究意义及结构安排.....	4
第二章 机器人控制系统硬件架构及软件开发环境.....	6
2.1 机器人控制系统总体架构.....	6
2.2 运动控制器.....	6
2.3 伺服驱动系统.....	9
2.4 机器人开发平台.....	10
2.4.1 机器人硬件开发平台.....	11
2.4.2 机器人软件开发平台.....	11
2.5 本章小结.....	12
第三章 工业机器人运动学建模及插补原理仿真.....	13
3.1 机器人正运动学建模.....	13
3.2 机器人逆运动学建模.....	14
3.3 逐点比较法原理及仿真.....	15
3.3.1 直线插补.....	15
3.3.2 圆弧插补.....	19
3.4 本章小结.....	21
第四章 工业机器人运动轨迹插补实验.....	22
4.1 轨迹插补实验.....	22
4.1.1 运动控制程序设计.....	22
4.1.2 可视化界面的建立.....	23
4.2 结果分析.....	25
4.3 本章小结.....	28
第五章 总结与展望.....	29
参考文献.....	30
附录 1.....	32

附录 2 .....	33
致谢 .....	36

# 第一章 绪论

## 1.1 引言

工业机器人是由多学科相互交织融合发展而来的智能设备，其主要涉及到传感技术、网络通信技术、人工智能技术等高新科技领域，在推动我国智能制造业发展升级中占据重要地位。现如今，工业机器人在汽车制造、电子、物流、食品药品加工等领域得到了广泛的应用。与传统人工技术相比，工业机器人具有显著的优势<sup>[1]</sup>：1) 生产可靠性高且能够有效减少事故对员工人身伤害；2) 不仅可以减轻公司员工的工作压力，而且对生产效率的提高也有一定作用；3) 能代替部分高技能工人，解决招聘难问题，同时能够降低生产成本。因而，生产机器人的厂家以及研究机器人的科研机构日益增多。虽然这有利于机器人技术在国内的发展与应用，但也带来诸多问题，如机器人控制系统开放性、兼容性较差，用户难以对机器人进行再次开发，因此开放式可重构机器人控制系统又走进人们的视野。本文将借助于开放式可重构机器人开发平台的基础运动模式对机器人轨迹插补进行研究。

## 1.2 工业机器人的发展现状及发展趋势

### 1.2.1 工业机器人发展历程

目前，工业机器人的发展主要经历了示教再现型、感知型、智能型三代。

工业机器人的起源可以追溯到第二次世界大战期间，主要应用于核辐射环境下的作业，是一遥控机械手，当前该机械手被认为是第一台工业机器人的原形。次年，一种主从式机械手又从该研究所诞生。而工业机器人的概念最早是由美国的戴沃尔于 1954 年提出，并申请注册了相关专利。随后，1959 年，美国 Unimation 公司成功研制并定型生产世界上最早的工业机器人原型样机 Unimate<sup>[2]</sup>。1962 年，Unimate 首次被使用于美国通用汽车公司，至此便诞生了最早的示教再现机器人。从这以后，工业机器人逐渐走进人们的生活中，尤其是在汽车制造的各个环节。进而，人们在此基础上研发出弧焊、搬运等具有不同功能的机器人以适用于人们的生产制造，并逐渐缓解劳动力短缺给制造业带来的压力。当时的示教再现机器人确实给世界制造业带来了极大的便利，但随着生产技术的改变，其弊端慢慢显现出来，因其不具有外界感知能力，便无法判断工作质量的好坏。基于此，人们开始了第二代机器人的研发。

20 世纪 60 年代末，传感器技术的飞速发展作为第二代感知型机器人的研发与生产带来了极大的便利。美国麻省理工学院率先于 1965 年研制出具有识别、定位功能的早期第二代感知型机器人。较于第一代工业机器人，第二代机器人能够

感知外界信号并具有一定的反馈功能，能够更方便的适用于较恶劣环境的勘探等更为复杂的工作。虽然与第一代机器人相比，第二代机器人有了明显的改进，但其与第一代机器人一样，具体的功能仍旧受限于其制造者<sup>[3]</sup>。

人们对第三代智能型机器人的探索随着计算机技术和人工智能技术的发展而展开。智能型机器人的控制器更加先进，能够通过各种先进控制算法，实现对环境、自身的监控，对目标路径的自主规划等。其与第二代机器人相比，具有了自主学习的能力。1966 年至 1972 年间，SRI 人工智能中心研制出第一台具有一定智能性的机器人 Shakey。虽然 Shakey 体积较大，运算处理速度慢，但确是当时最成功的将 AI 技术运用到机器人上的例子，进而激发了人们对智能机器人的探索。目前，机器人领域的重点企业对智能型机器人的研究取得了一定的突破。例如 Boston Dynamics 公司所生产的 Little Dog 机器人，它能够通过对错误姿态的分析学习，从而调整行进的姿态。又如由软银集团和 Aldebaran Robotics 共同研发的 Pepper 机器人，它能够通过深度学习以及视觉检测等技术，判别人类的情绪，并结合判别结果调整与人类交流的语气<sup>[4]</sup>。虽然当前的智能机器人具有一定的自主性，但是其实质上仍旧是弱人工智能<sup>[5]</sup>。因此，智能机器人在未来仍具有很大的发展空间。

### 1.2.2 国内外工业机器人发展现状

1962 年，在美国诞生了最早的工业机器人，但后来由于美国对于工业机器人产业化并不重视，而过于重视特种机器人的研发，导致日本后来者居上。目前，美国的军用、太空、海洋等领域的特种机器人在业内具有很高的评价。但随着工业机器人优势的显现，美国越来越重视工业机器人的发展与应用，于 2011 年通过了 AMP 计划，明确表明要通过工业机器人来振兴美国的制造业<sup>[6]</sup>。日本由于国土面积狭小，劳动力严重短缺，导致人工成本增加、生产效率低下，极其不利于本国制造业的发展。为使生产成本得到降低并且能够提高生产效率，日本大力推广工业机器人的使用，进而使得工业机器人的应用与研发在日本得到了极大的扩展。当前，日本的安川、川崎等机器人已经占据了工业机器人领域的一席之地，另外日本的伺服电机、精密减速器等零部件也占据着国际市场极大的份额<sup>[7]</sup>。

我国就机器人技术这方面而言，与美国、德国、日本等国家还有较大差距。1986 年，我国开展高技术研究发展计划，在此之后我国才开始对机器人技术的理论、科学实验进行有计划的研究。但当时受限于我国的基本国情，加之在制造业中，劳动密集型产业占据绝大多数，从而使得工业机器人的研发应用程度仍旧较低。而于此同期的日本、德国等国家早已开始大量应用工业机器人于汽车、电子等领域。

我国工业机器人发展的黄金时期是 21 世纪以后，尤其是近五年来。我国劳动力人口结构的改变<sup>[8]</sup>迫使制造业转型升级，外加我国出台《机器人产业发展规

划（2016-2020 年）》等文件政策的扶持，我国不仅自主研发出多种功能各异的工业机器人，而且在机器人核心零部件、控制系统等方面的自主研发能力也有所突破<sup>[9]</sup>。目前，我国工业机器人的控制器已经基本可以实现国产化。但总体看来，我国工业机器人技术与发达国家相比较，仍具有工业机器人核心技术较为薄弱，核心零件依旧依赖进口，品牌说服力较弱等问题<sup>[10]</sup>。由此可见，我国仍需全力以赴发展工业机器人技术。

### 1.2.3 工业机器人发展趋势

随着人工智能技术的发展以及智能制造产业的兴起，工业机器人正在逐渐展现出其独特的魅力及强大的潜力。人们将更多的目光转向机器人技术的发展。应制造业转型升级的需要，未来工业机器人的研究趋势将朝着如下发展<sup>[11]</sup>：

#### 1) 控制技术的开放化

随着制造业的转型升级，传统的机器人控制系统已经不能再满足现代制造业的需求，现代制造业要求机器人具有更高的开放性及柔性。因此，国内外各大科研院所均将机器人开放式控制系统作为研究的重点。开放式控制系统具有更高的适应性及灵活性<sup>[15]</sup>，用户只需花费极少的时间调试系统便可满足不同的需求。

#### 2) 自主性学习

自主性学习是未来机器人不可或缺的技能。机器人正在逐渐解放人类劳动力，加之其内部复杂的控制程序以及精密的硬件设备，在未来，机器人必然可以像人一样学习、工作。机器人具有自主学习之后，便具有一定的创新能力，能够处理一些突发性事件，从而更好的为人类服务。

#### 3) 融合 5G、云计算、虚拟现实等高新技术

目前，随着我国科技水平的迅速提高，涌现出一大批高新技术。机器人技术可以结合这些高新技术，以提高对机器人的控制能力，使机器人更便于为人类生产生活服务。

#### 4) 结构模块化、标准化、通用化

未来机器人将会是模块化结构，且配备标准化接口以及使用标准化零件。如此，一方面能够提高机器人的通用性，另一方面更加便于机器人的制造生产，从而有利于机器人应用的普及。

#### 5) 更高层次的人机协作

人类和机器人共同完成一项工作，既可以发挥出机器人的高效性，又能发挥出人类的主观创造性。如此，不仅能为企业降低生产成本，又能大幅度提高企业员工的工作效率。因此，更高层次的人机协作将成为未来企业工厂生产的主流模式。而更高层次的人机协作将要求机器人具有更高的柔性以及实时性<sup>[16]</sup>。

无论工业机器人未来如何发展，对其运动控制的研究是基础性且必不可少的研究，其中，插补运动对机器人运动控制又具有十分重要的意义。

### 1.2.4 机器人插补理论

当前，大多数情况下，我国工业机器人的运动轨迹较为简单，一般由直线、圆弧、二次曲线等组合而成，这是由于工业机器人主要应用于喷涂、焊接、搬运等不需具有较高自主智能性的特定任务上。当工业机器人要完成较复杂的曲线运动时，通常会采取用直线、圆弧等简单的线条去逼近的方法。这样一方面既可以满足实际需要的精度又可以降低经济成本，另一方面当前的基本轨迹曲线的插补算法及轨迹规划等理论比较成熟。本文将主要研究二维平面内工业机器人的基本轨迹曲线，而对机器人轨迹曲线的研究离不开机器人的插补运动。

插补即机器人控制系统根据插补的参数计算出点列并形成运动轨迹的过程。由此可见插补主要由三部分构成：插补的参数、计算的方程、插补结果即插补形成的运动轨迹。其中，插补的参数由两部分组成。其一，参数包括起点坐标、终点坐标等示教点的位置，直线、圆弧等插补方式。轨迹运动方程一般由其确定。其二，参数包括起点速度、终点速度、匀速速度、变加速速度等。机器人末端执行器运动状态一般由其确定。

软件、硬件均可以实现插补。在机器人发展的早期，一般是采用硬件的逻辑电路来控制插补。而当前，较常用的两种插补方式基准脉冲、数据采样插补是由软件来完成的。基准脉冲插补法是向伺服系统中输入每次插补运算得到的指令脉冲。数据采样插补法是将轨迹曲线分割，通过插补程序在每一个周期内的计算，得到每一段轨迹曲线里各坐标的增长值。因此，基准脉冲插补法具有进给速度受限制的缺点，但其也具有运算直观，插补误差小于或等于一个脉冲当量，脉冲的输出较为均匀且调节方便等优势。数据采样插补法虽然不受进给速度的限制但运算较为复杂。本文将从逐点比较法展开，并结合开放式可重构机器人开发平台中的基本运动模式，对直线、圆弧插补法展开论述。

### 1.3 本文研究意义及结构安排

机器人与传统人工技术相比具有显著的优势，而我国工业机器人技术水平与世界一流水平相比还有较大差距。因此对于工业机器人的研究尤其是对其控制技术的研究，十分有利于提高我国机器人技术水平及加快我国自动化产业进程。而在机器人运动控制中，插补运动具有极其重要的意义。同时，本课题的研究是基于开放式可重构机器人开发平台，这也符合机器人控制系统未来的发展趋势。

本文结构安排如下：

第一章绪论 通过阐述工业机器人的优势、发展历程，分析国内外发展现状及未来发展趋势，同时分析插补算法的优缺点，说明了本文的研究背景及研究意义。最后指出论文的整体结构安排。

第二章机器人控制系统硬件架构及软件开发环境 在了解机器人控制系统总

体架构的基础上，先对运动控制器的选型、基础运动模式等进行了说明。后对伺服驱动器的选型进行了说明。最后对 CPAC 软件开发平台进行了阐述。

第三章工业机器人运动学建模及插补原理仿真 在已经了解机器人运动学的基础上，通过 DH 法建立工业机器人坐标系，并建立工业机器人正逆运动学模型。后对直线、圆弧插补原理进行分析，并通过 MATLAB 软件进行仿真验证。

第四章工业机器人运动轨迹插补实验 在第二、三章的基础上结合机器人开发平台进行插补运动实验，后进行实验结果的分析。

第五章总结与展望 总结全文所开展的工作内容并展望后期的研究与发展方向。

## 第二章 机器人控制系统硬件架构及软件开发环境

### 2.1 机器人控制系统总体架构

工业机器人控制系统主要由三部分组成。其一，主控单元，主要负责数据的计算处理工作，同时也与人机交互界面 HMI 一起负责相关系统参数的显示、设定以及向执行机构发送运动信号等。其二，执行机构，负责执行主控单元控制指令。其三，检测单元，负责对执行机构的执行状态进行监测，并将数据反馈给主控单元。本控制系统主要采用嵌入式控制器加工控机的方式实现控制功能。如图 2-1 为控制系统总体框架图。

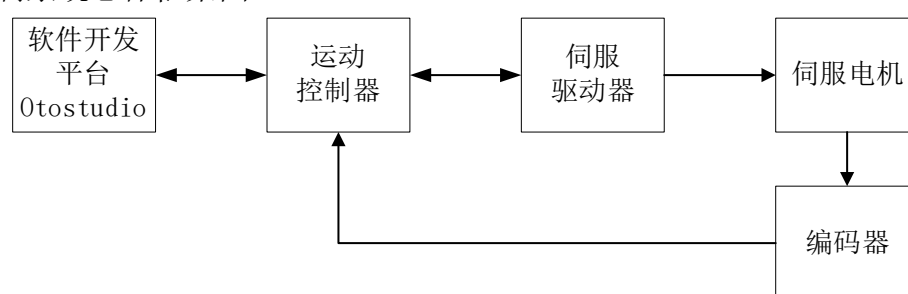


图 2-1 控制系统总体框架图

本系统以嵌入式控制器为控制系统的核心，由伺服驱动器及伺服电机共同组成执行机构。用户可通过 PC 端 Otostudio 软件进行控制指令的编写，在完成通信参数的设置后，可将指令下载进嵌入式控制器。控制器接收指令并做分析处理后，给伺服驱动器实时发送各轴的进给运动信号，从而控制各伺服电机的运动。在此期间，嵌入式控制器还可实时接收编码器所反馈的各轴运动信息，用户也可在 PC 端的 Otostudio 软件上通过编写可视化界面程序获得该信息，从而形成一个闭环控制系统。本控制系统以嵌入式控制器代替传统的 IPC+运动控制卡的开放式控制系统，具有整体结构更加紧凑、兼容性及开放性更加理想的优势<sup>[17]</sup>。根据机器人控制系统总体的架构，我们所设想在 PC 端 Otostudio 软件上进行六边形、圆形插补运动程序的编写以及可视化界面的设计，且将在可视化界面上显示实时运动轨迹、轨迹误差、各轴运动状态等信息，是可行的。

### 2.2 运动控制器

嵌入式运动控制器具有微型化、紧凑化的优点，它不仅可以满足控制系统对实时性的要求，而且可以改善系统的稳定性，正逐渐被越来越多的机器人公司所欢迎。

针对于本机器人系统而设计的控制平台采用 GTC-RC800 型号的控制器，本运动控制器是在 GUC-T 系列嵌入式多轴运动控制器的基础上丰富了常用的机器

人功能信号，从而形成的一款功能全面（既能完成普通 PC 机的基本功能，又支持多轴高性能协调运动及高速点位运动的控制）、结构紧凑的高性能机器人运动控制器。GUC-T 嵌入式多轴运动控制器如图 2-2 所示。GTC-RC800 运动控制器如图 2-3 所示。



图 2-2 GUC-T 嵌入式多轴运动控制器



图 2-3 GTC-RC800 运动控制器

GTC-RC800 系列嵌入式运动控制器支持如 PS2、USB 等常见的计算机接口以及专用的运动控制接口，从而为用户连接其他通用 IO 设备提供便利。如图 2-4、2-5 为 GTC-RC800 运动控制器接口图。

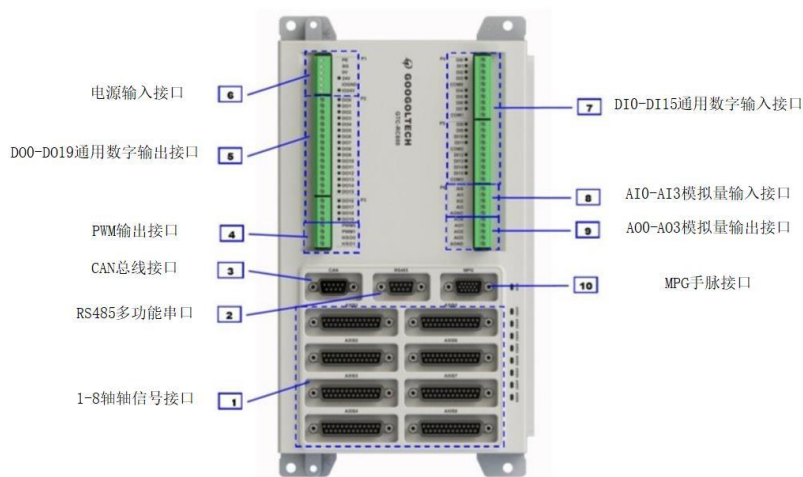


图 2-4 GTC-RC800 运动控制器正面接口图

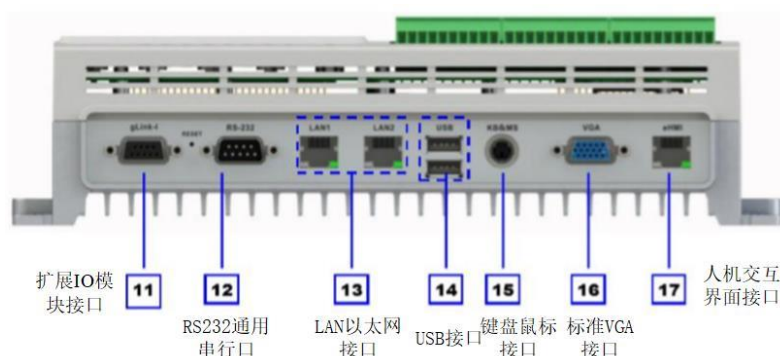


图 2-5 GTC-RC800 运动控制器上侧面接口图

从图中我们可以看出运动控制器正面多为各运动控制接口，上侧面多为 PC 系统接口。

在以运动控制器为基础做二次开发之前，需要先对控制器进行基础配置，从而将运动控制器的软硬件资源整合起来。用户可以通过 MCT2008 运动控制器管理软件或者是 Otostudio 软件对系统各轴参数、脉冲控制模式、编码器参数、闭环控制参数等系统参数进行配置。如图 2-6 为控制器基本配置图。

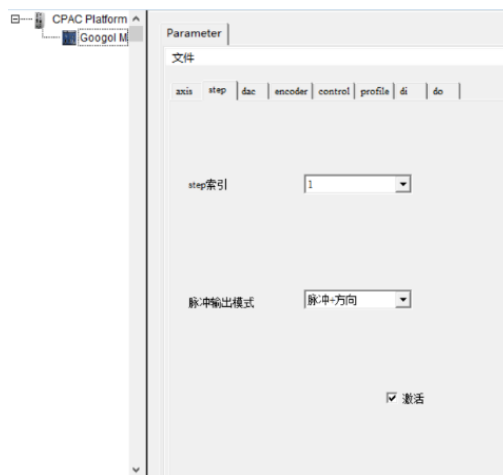


图 2-6 控制器基本配置图

GTC-RC800 运动控制器为我们提供了以 GT\_PrFTrap 指令为主的点位运动、以 GT\_PrFJog 指令为主的 JOG 模式、以 GT\_PrFPt 指令为主的 PT 模式、以 GT\_PrFGear 指令为主的电子齿轮、以 GT\_PrFFollow 指令为主的 FOLLOW 模式五种基本的运动模式。不同的运动模式具有不同的特点，用户可以根据项目的需求，选择合适的运动模式。本文将定位准确、控制简单的点位运动为基础来研究机器人运动轨迹的插补。

在点位运动模式下，每个轴可以独立运动或停止，并且用户可以为每个轴设置不同的运动参数。点位运动指令如表 2-1 所示。

表 2-1 点位运动指令表

指令	说明
GT_PrFTrap	将轴指定为点位运动模式
GT_SetTrapPrm	设置点位运动模式参数
GT_GetTrapPrm	读取点位运动模式参数
GT_SetPos	设置目标位置
GT_GetPos	读取目标位置
GT_SetVel	设置目标速度
GT_GetVel	读取目标速度
GT_Update	启动点位运动

用户可通过 GT\_Update 指令的调用来启动点位运动，同时用户可通过设置平滑时间参数来解决运动平稳性问题。在用户设定运动参数后，运动控制器对参数进行分析处理并自动生成速度规划曲线。如图 2-7 即为点位运动速度曲线。

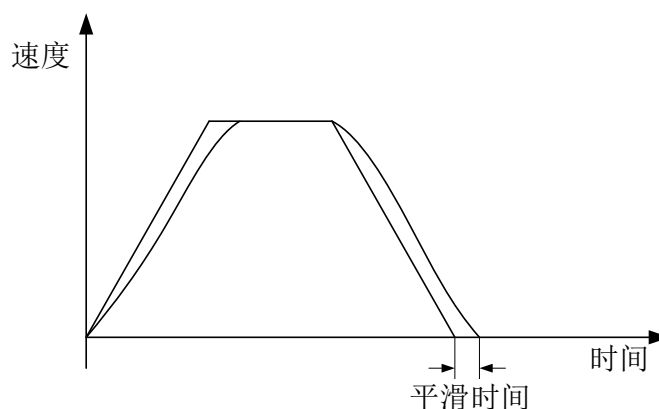


图 2-7 点位运动速度曲线

## 2.3 伺服驱动系统

伺服驱动器在工业自动化控制领域具有重要的作用，其经常被应用在工业机器人、自动化生产线等方面。本文以 GTHD 伺服驱动器为主构建了伺服驱动系统。

GTHD 伺服驱动器为用户提供位置控制、速度控制、电流控制三种控制模式，且三者之间两两可以进行转换。另外，GTGD 系列伺服驱动器还可以高性能的控制所有常见的永磁电机，支持多种指令输入，支持多种电机的反馈。同时，为了减小位置误差，缩短系统调整时间，其采用了先进的电流环控制算法；为了解决位置误差随速度变化而变化的问题，其又采取了独特的 HD 非线性控制算法。除此之外，GTGD 系列伺服驱动器还具有操作简单的特点，固高公司为用户提供了图形化的设置界面，更加便于本项目对驱动器参数的设置以及对驱动器的调试。GTGD 系列伺服驱动器如图 2-8 所示。



图 2-8 GTGD 系列伺服驱动器

## 2.4 机器人开发平台

CPAC 计算机可编程自动化控制器是一个将计算机、运动控制、逻辑控制、人机交互、现场网络等集成在一起的工业控制领域的软硬件开发平台。其主要由运动控制器、IO 模块、伺服驱动器等硬件以及软件开发平台 Otostudio 组成，且具有开放的体系架构、标准化的编程环境、丰富的 API 函数等特点。如图 2-9 即为 CPAC 开发平台。



图 2-9 CPAC 开发平台

### 2.4.1 机器人硬件开发平台

本文中所用的 CPAC 开发平台硬件设备主要由 GTC-RC800 运动控制器、GTHD 伺服驱动器、gLink200 数字量模块、HMI 人机交互等组成。CPAC 控制器是本硬件平台的核心。为了提高本项目运动控制的精度,CPAC 控制器采用了 DSP 芯片控制多轴电机运动以及插补运算;同时为了保证本设备与其他设备的通信状况良好,其采用英特尔 X86 架构的芯片负责 USB、HMI、TCP/IP 等接口的通信<sup>[18]</sup>。由此可见 CPAC 控制器能够很好的承担控制机器人运动这一重任。如图 2-10 为机器人硬件开发平台框图。

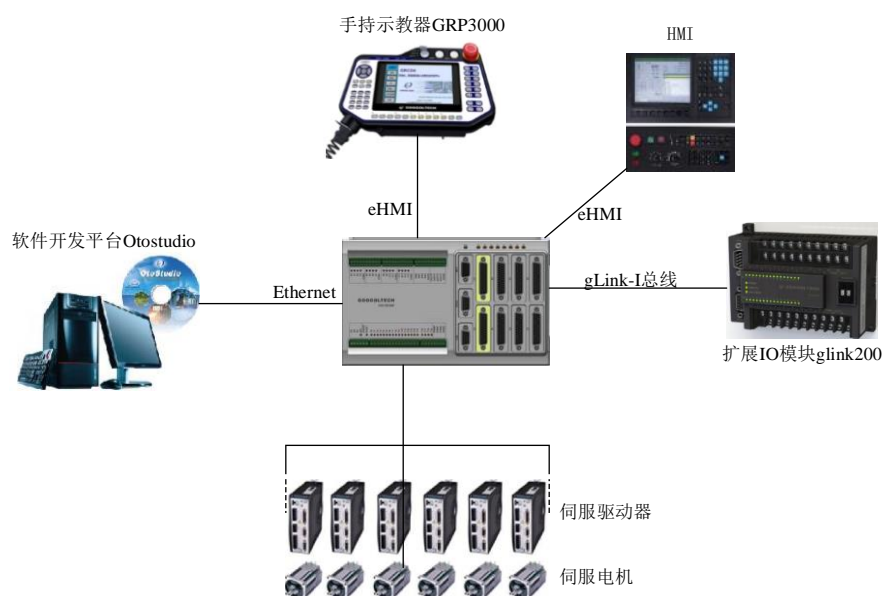


图 2-10 机器人硬件开发平台框图

### 2.4.2 机器人软件开发平台

CPAC 采用 Otostudio 作为其软件开发环境。Otostudio 是一款基于 IEC61131-3 国际标准的开发软件。它具有十分便捷的开发方式,为本项目运动控制程序的编写提供了 IL 指令表语言、FBD 功能块图、CFC 连续功能图、LD 梯形图、ST 结构化文本五种开发语言,本项目将采用 ST 结构化文本来设计运动控制程序;同时它采用模块化的编程方式,有利于简化本项目程序;此外其还提供了运动控制功能块,从而更加便于本项目对运动控制程序的编写,同时提高了程序的可移植性。软件系统为便于远程数据交互,提供了基于 TCP/IP 通讯协议的 web 接口,提高了系统的开放性。针对传统 PLC 控制的人机界面简陋的问题,软件系统为用户提供 HMI 软件包,集成了可视化功能,从而使得本项目可以根据自己的设想设计可视化界面。总之, Otostudio 软件是一款结构先进、功能全面、便于使用的开发工具。Otostudio 软件编程环境如图 2-11 所示。



### 第三章 工业机器人运动学建模及插补原理仿真

机器人运动学由正运动学、逆运动学所组成。正运动学主要是根据机器人各个关节变量的值来确定机器人末端执行机构的位置姿态，而逆运动学正好与之相反。逆运动学是根据机器人末端执行器的位置姿态，反推出机器人各关节变量值。本文主要对平面二自由度的机器人进行运动学分析。

#### 3.1 机器人正运动学建模

在已知坐标原点  $O$ ， $OA$  连杆长度为  $L_1$ ， $AB$  连杆长度为  $L_2$  的情况下，求解  $B$  点的坐标。如图 3-1 所示。

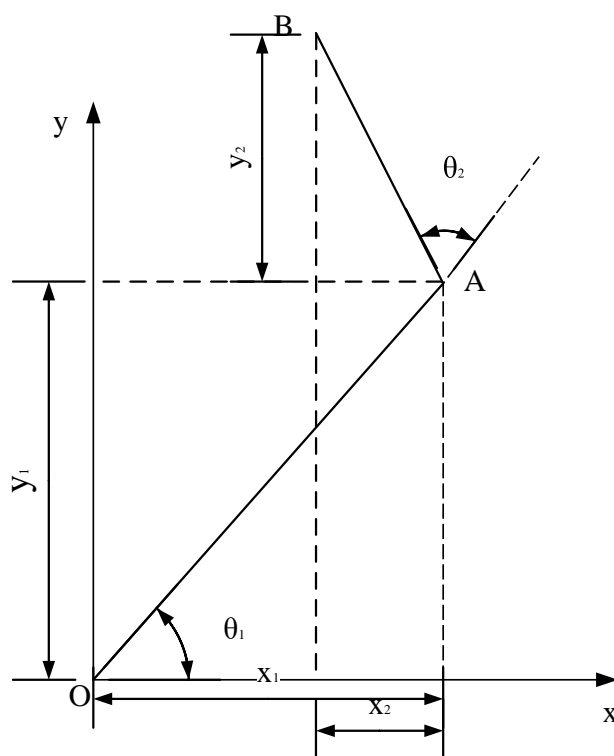


图 3-1 运动学正解

设  $B$  点坐标为  $(x, y)$ ，则有：

$$x_1 = L_1 \cos \theta_1 \quad (1)$$

$$x_2 = L_2 \cos(\pi - \theta_1 - \theta_2) = -L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (2)$$

则：

$$x = x_1 - x_2 = L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (3)$$

$$y_1 = L_1 \sin \theta_1 \quad (4)$$

$$y_2 = L_2 \sin(\pi - \theta_1 - \theta_2) = L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (5)$$

则：

$$y = y_1 + y_2 = L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (6)$$

### 3.2 机器人逆运动学建模

在已知 B 点坐标  $(x, y)$ ，OA 连杆长度为  $L_1$ ，AB 连杆长度为  $L_2$  的情况下，求解各关节角度。如图 3-2 所示。

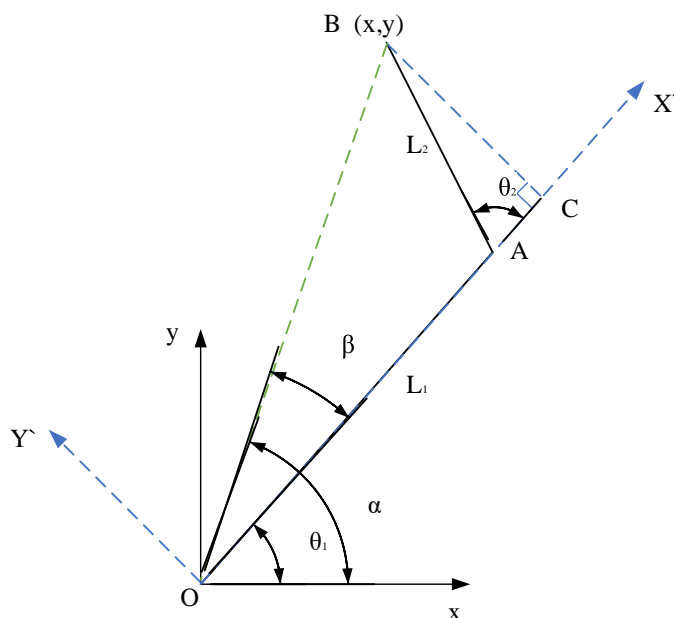


图 3-2 运动学逆解

在三角形 OAB 中，由余弦定理可得：

$$\cos \theta_2 = -\frac{L_1^2 + L_2^2 - x^2 - y^2}{2L_1L_2} \quad (7)$$

令

$$\cos \theta_2 = \frac{-L_1^2 - L_2^2 + x^2 + y^2}{2L_1L_2} = d \quad (8)$$

则有：

$$\theta_2 = \text{atan2}(\pm\sqrt{1-d^2}, d) \quad (9)$$

$$\theta_1 = \alpha - \beta \quad (10)$$

令

$$\sin\theta_2 = e \quad (11)$$

则：

$$\theta_1 = \text{atan2}(y, x) - \text{atan2}(L_2 e, L_1 + L_2 d) \quad (12)$$

为了简化计算，不对反正弦函数及反余弦函数进行分情况讨论，同时为了提高容错性，在此引入双变量反正切函数  $\text{atan2}$ 。

### 3.3 逐点比较法原理及仿真

逐点比较法即每次只向运动轴输入一个进给脉冲，后通过判断运动轴的瞬时坐标与给定坐标间的误差，从而确定下一步运动方向。由此可见，逐点比较法主要是由位置的判定、坐标的进给、偏差的计算、终点的判定这四步组成。如图 3-3 即为逐点比较法流程图。

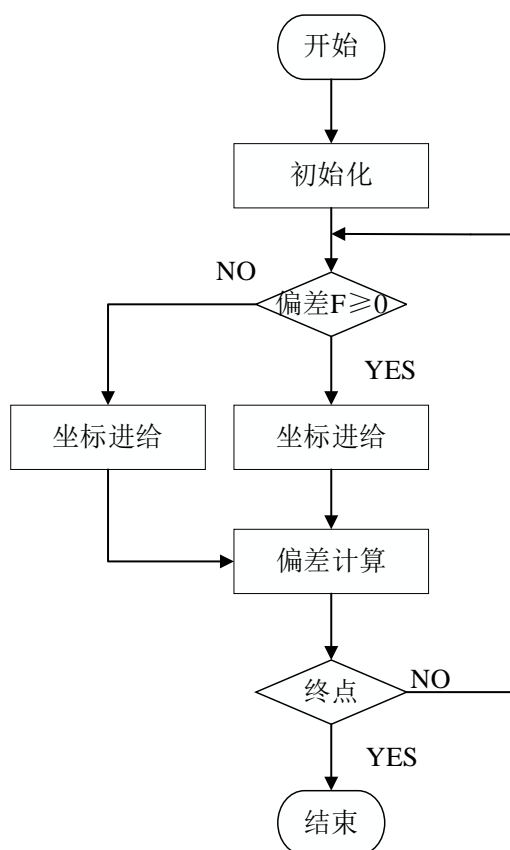


图 3-3 逐点比较法流程图

#### 3.3.1 直线插补

在二维坐标系下，我们不妨假设起点 A 的坐标为  $(x_s, y_s)$ 、终点 B 的坐标为  $(x_e, y_e)$ 、瞬时点 C 的坐标为  $(x_i, y_i)$ 。如图 3-4 所示。

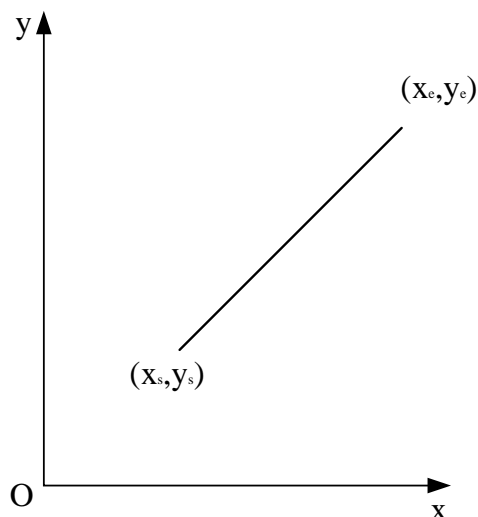


图 3-4 第一象限走向示意图

C 点位置可位于 AB 线段上方、下方以及 AB 线段上。

当 C 点位于 AB 线段上时，根据线段的斜率可知：

$$\frac{y_i - y_s}{x_i - x_s} = \frac{y_e - y_s}{x_e - x_s} \quad (13)$$

即：

$$(x_e - x_s)y_i - (y_e - y_s)x_i - y_s x_e + y_e x_s = 0 \quad (14)$$

当 C 点位于 AB 线段上方时，则有：

$$(x_e - x_s)y_i - (y_e - y_s)x_i - y_s x_e + y_e x_s > 0 \quad (15)$$

当 C 点位于 AB 线段下方时，则有：

$$(x_e - x_s)y_i - (y_e - y_s)x_i - y_s x_e + y_e x_s < 0 \quad (16)$$

令：

$$F = (x_e - x_s)y_i - (y_e - y_s)x_i - y_s x_e + y_e x_s \quad (17)$$

当  $F \geq 0$  时，应向 X 轴正方向运动一个脉冲当量；当  $F < 0$  时，应向 Y 轴正方向运动一个脉冲当量。

为了简化运算，便于数据的处理，在此将使用递推的方式处理偏差<sup>[19]</sup>。

假设点  $C(x_i, y_i)$  处于  $F \geq 0$  的情况时，下一步运动后其坐标应为  $(x_i + 1, y_i)$ ，则此时的偏差值  $F_{nx}$  为：

$$F_{nx} = F - (y_e - y_s) \quad (18)$$

同理当点  $C(x_i, y_i)$  处于  $F < 0$  的情况时，有新偏差值  $F_{ny}$  为：

$$Fny = F + x_e - x_s \quad (19)$$

由此，我们可以推出二、三、四象限走向的进给方向。如表 3-1 所示，为四个象限直线插补进给方向及偏差的计算。

表 3-1 四象限直线插补进给方向及偏差的计算

插补方式	象限	坐标进给		偏差计算	
		$F \geq 0$	$F < 0$	$F \geq 0$	$F < 0$
直线插补	第一象限	$+\Delta x$	$+\Delta y$	$F_n = F - (y_e - y_s)$	$F_n = F + (x_e - x_s)$
	第二象限	$+\Delta y$	$-\Delta x$	$F_n = F + (x_e - x_s)$	$F_n = F + (y_e - y_s)$
	第三象限	$-\Delta x$	$-\Delta y$	$F_n = F + (y_e - y_s)$	$F_n = F - (x_e - x_s)$
	第四象限	$-\Delta y$	$+\Delta x$	$F_n = F - (x_e - x_s)$	$F_n = F - (y_e - y_s)$

通过计算我们可以得知不同象限的插补过程类似，只是脉冲进给方向及偏差计算公式有所不同。为了简化程序、提高插补计算速度，我们可以采用坐标变换法，即取终点 B 坐标的绝对值进行计算。如表 3-2 所示为采用坐标变换法之后的四象限直线插补进给方向及偏差计算。

表 3-2 采用坐标变换法后的四象限直线插补进给方向及偏差计算

插补方式	象限	坐标进给		偏差计算	
		$F \geq 0$	$F < 0$	$F \geq 0$	$F < 0$
直线插补	第一象限	$+\Delta x$	$+\Delta y$		
	第二象限	$-\Delta x$	$+\Delta y$	$F_n = F -  y_e - y_s $	$F_n = F +  x_e - x_s $
	第三象限	$-\Delta x$	$-\Delta y$		
	第四象限	$+\Delta x$	$-\Delta y$		

结合所推导的直线插补公式，通过 MATLAB 软件对四个象限的直线插补进行仿真。如图 3-5 为直线插补仿真程序流程图。图 3-6 为起点均为(0,0)，终点分别为(6,4)、(-9,5)、(-11,-9)、(6,-5)，插补步长均为 1 的直线插补仿真结果。

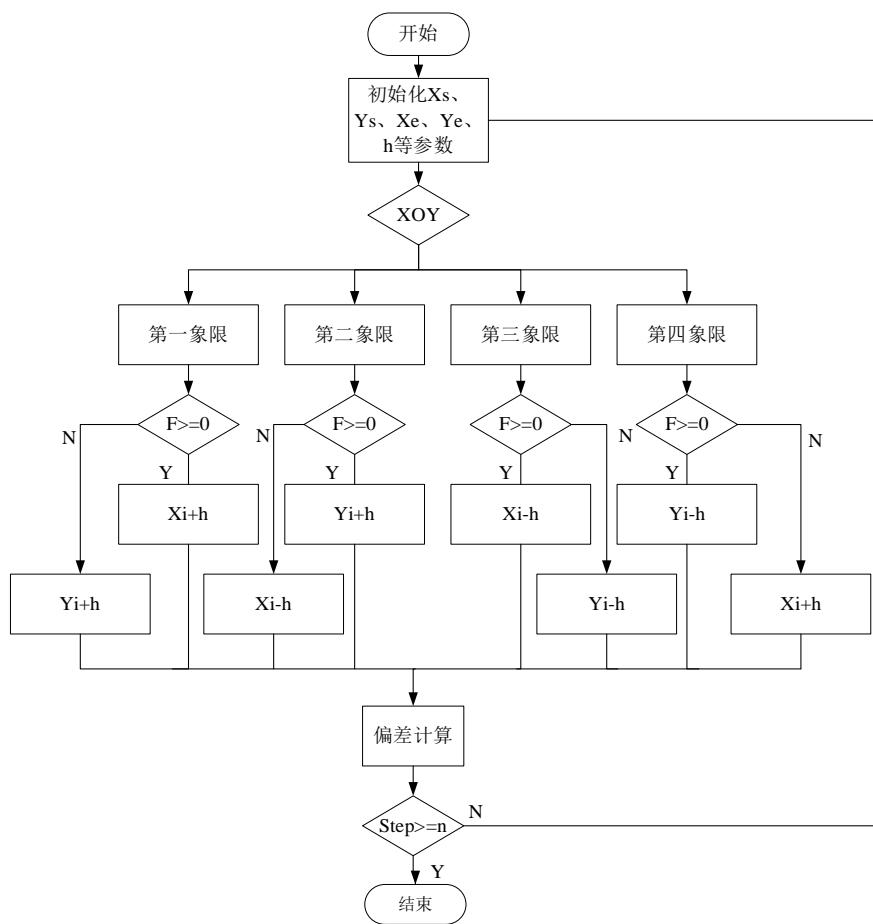


图 3-5 直线插补仿真程序流程图

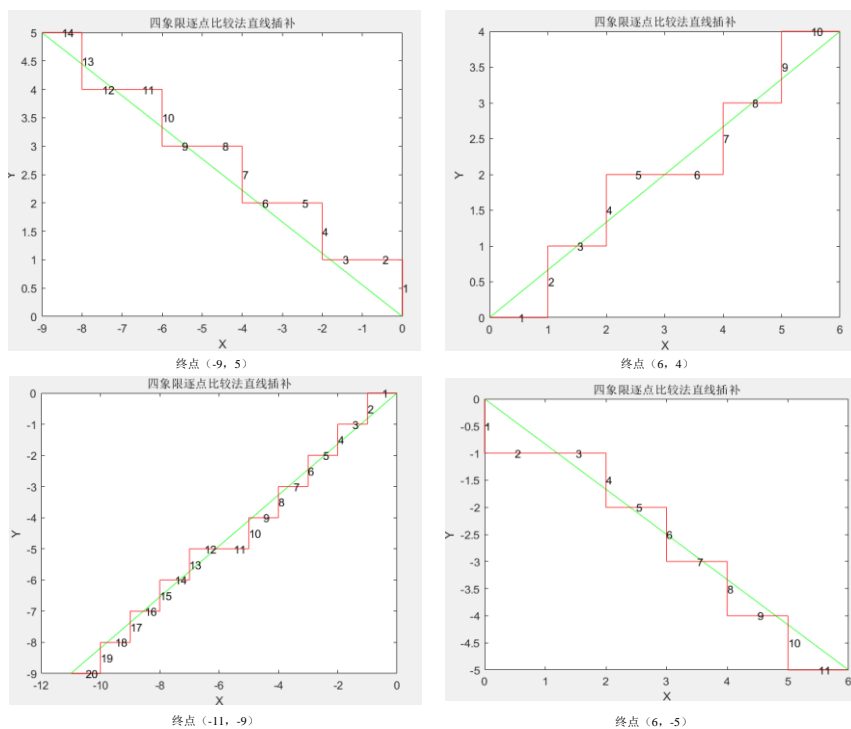


图 3-6 直线插补仿真结果

### 3.3.2 圆弧插补

圆弧插补的思想与直线插补思想类似，不过直线插补是通过线段的斜率判断瞬时点的位置，而圆弧插补是通过瞬时点到圆心的距离来判定瞬时点的位置。

以第一象限圆弧插补为例，设初始点 D 坐标为  $(x_0, y_0)$ ，终点 E 坐标为  $(x_n, y_n)$ ，瞬时点 P 的坐标为  $(x_m, y_m)$ ，以原点为圆心，半径为 R。若 P 点位于圆弧 DE 上，则应有：

$$x_m^2 + y_m^2 = x_n^2 + y_n^2 = R^2 \quad (20)$$

若 P 点位于圆弧 DE 外侧，则有：

$$x_m^2 + y_m^2 > x_n^2 + y_n^2 = R^2 \quad (21)$$

若 P 点位于圆弧 DE 内侧，则有：

$$x_m^2 + y_m^2 < x_n^2 + y_n^2 = R^2 \quad (22)$$

由此我们可取  $F_h$  偏差函数表达式为：

$$F_h = x_m^2 + y_m^2 - R^2 \quad (23)$$

当圆弧 DE 为逆时针圆弧且  $F_h \geq 0$  时，瞬时点下一次运动应向 X 轴负半轴运动一个脉冲当量；当圆弧 DE 为逆时针圆弧且  $F_h < 0$  时，瞬时点下一次运动应向 Y 轴正半轴运动一个脉冲当量。

圆弧插补也可根据直线插补简化的思想，采用递推的方式推导偏差函数。此处便简单推导。当  $F_h \geq 0$  时，新偏差函数  $F_{h+1}$  为：

$$F_{h+1} = F_h - 2x_m + 1 \quad (24)$$

当  $F_h < 0$  时，新偏差函数  $F_{h+1}$  为：

$$F_{h+1} = F_h + 2y_m + 1 \quad (25)$$

同理，当圆弧 DE 为顺时针圆弧且  $F_h \geq 0$  时，瞬时点下一次运动应向 Y 轴负半轴运动一个脉冲当量；当圆弧 DE 为顺时针圆弧且  $F_h < 0$  时，瞬时点下一次运动应向 X 轴正半轴运动一个脉冲当量。

当  $F_h \geq 0$  时，新偏差函数  $F_{h+1}$  为：

$$F_{h+1} = F_h - 2y_m + 1 \quad (26)$$

当  $F_h < 0$  时，新偏差函数  $F_{h+1}$  为：

$$F_{h+1} = F_h + 2x_m + 1 \quad (27)$$

根据第一象限顺时针圆弧、逆时针圆弧的插补过程，进一步可以推导出其他象限顺时针、逆时针圆弧的插补公式。在其他象限插补公式推导过程中采用坐标变换的方式，得到如表 3-3 所示的圆弧插补计算公式。

表 3-3 圆弧插补计算公式

插补方式	象限	坐标进给		偏差计算	
		$F_h \geq 0$	$F_h < 0$	$F_h \geq 0$	$F_h < 0$
顺圆插补	第一象限	$-\Delta y$	$+\Delta x$	$F_{h+1} = F_h - 2y_m + 1$	$F_{h+1} = F_h + 2x_m + 1$
	第二象限	$+\Delta x$	$+\Delta y$	$F_{h+1} = F_h - 2x_m + 1$	$F_{h+1} = F_h + 2y_m + 1$
	第三象限	$+\Delta y$	$-\Delta x$	$F_{h+1} = F_h - 2y_m + 1$	$F_{h+1} = F_h + 2x_m + 1$
	第四象限	$-\Delta x$	$-\Delta y$	$F_{h+1} = F_h - 2x_m + 1$	$F_{h+1} = F_h + 2y_m + 1$
逆圆插补	第一象限	$-\Delta x$	$+\Delta y$	$F_{h+1} = F_h - 2x_m + 1$	$F_{h+1} = F_h + 2y_m + 1$
	第二象限	$-\Delta y$	$-\Delta x$	$F_{h+1} = F_h - 2y_m + 1$	$F_{h+1} = F_h + 2x_m + 1$
	第三象限	$+\Delta x$	$-\Delta y$	$F_{h+1} = F_h - 2x_m + 1$	$F_{h+1} = F_h + 2y_m + 1$
	第四象限	$+\Delta y$	$+\Delta x$	$F_{h+1} = F_h - 2y_m + 1$	$F_{h+1} = F_h + 2x_m + 1$

结合圆弧插补原理，通过 MATLAB 软件对逐点比较圆弧插补进行仿真。如图 3-7 所示为两坐标(1,4)、(4,1)之间的顺时针圆弧、逆时针圆弧插补图，插补步长均为 0.5。其他象限的顺时针圆弧、逆时针圆弧插补仿真结果见附图 1。

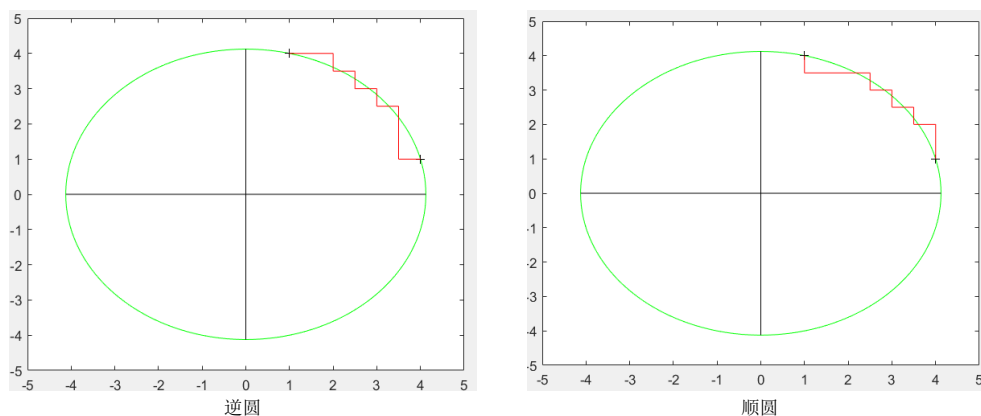


图 3-7 两坐标(1,4)、(4,1)之间的顺时针圆弧、逆时针圆弧插补图

通过直线、圆弧插补运动仿真结果可以得出实际运动轨迹在一定运动范围内贴近规划轨迹，并且这个运动范围不超过一个步长。这从而为其能够精确控制两轴伺服电机的运动提供了理论上的支撑。

### **3.4 本章小结**

本章首先通过 DH 法建立了平面二自由度机器人坐标系，并对机器人正、逆运动学进行了求解。后对逐点比较直线、圆弧插补算法进行了理论研究，并通过 MATLAB 软件进行了仿真验证，最终在理论上得出逐点比较直线、圆弧插补算法能够较精确的控制两轴伺服电机运动的结论，为下文项目的开展提供理论上的指导。

## 第四章 工业机器人运动轨迹插补实验

### 4.1 轨迹插补实验

#### 4.1.1 运动控制程序设计

在本项目中，对于运动控制程序的编写主要包括三部分，一是插补参数的设定，二是各轴运动参数的读取，三是轨迹误差的计算及误差的自动补偿。本项目程序结构图如图 4-1 所示。运动控制程序流程图如图 4-2 所示。

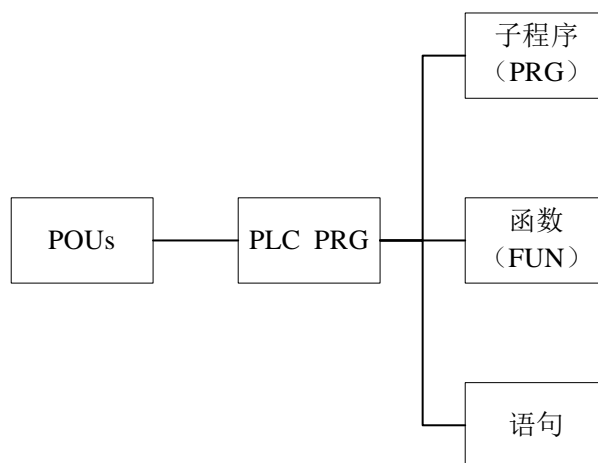


图 4-1 程序结构图

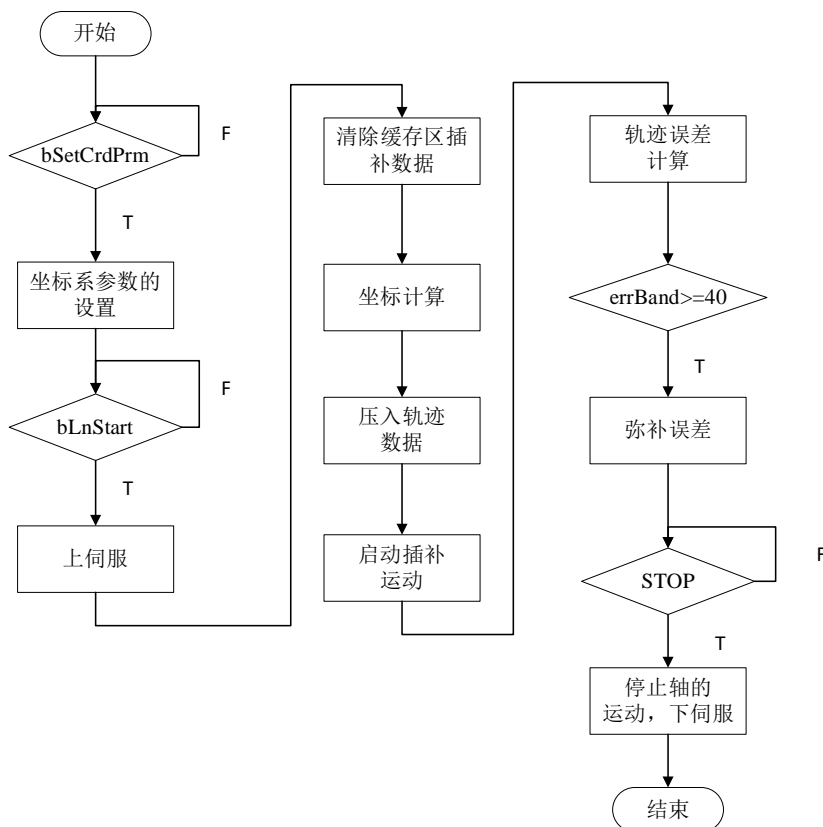


图 4-2 运动控制程序流程图

在本系统进行插补运动要分为两个步骤。其一是坐标系的建立。在项目建立的初期，所有轴都处在单轴运动状态下，因此我们首先需要建立一个坐标系，将各个电机映射到所建立的坐标系中。在此建立了一个二维坐标系，并将一号电机映射到 X 轴，将二号电机映射到 Y 轴，将轴的零位作为坐标系的原点。其二是向缓存区内压入轨迹数据。为了提高实时性，本系统设立了缓存区。用户只需将轨迹数据压入缓存区内，控制器在执行任务时将直接从缓存区内读取数据。本项目在编写程序时采用 FOR 循环的方式将数据压入缓存区内。

本项目主要是对各轴速度、位置等运动参数进行读取。为使程序简洁明了、便于检查、且可重复利用，各轴运动参数的读取是通过调用 Updata(PRG)子函数的方式实现的。本部分通过对运动参数的采集，为可视化界面上数据的显示及轨迹误差的计算做好数据上的准备。

本项目中的轨迹误差是指编码器的合成位置与坐标系规划位置的差值，并将差值赋给变量 errBand。当误差值大于等于 40 个脉冲时，系统自动进行误差的补偿。自动误差补偿的基本思路是，假设末端实际所走位置多于规划位置，则向其发出负向脉冲；当末端实际位置小于规划位置，则向其发出正向脉冲，从而在一定范围内调整误差。

#### 4.1.2 可视化界面的建立

作为人机交互的窗口，用户可以通过可视化界面直接控制各电机的运动以及更加直观的监测各电机的运行状态。本系统可视化界面是通过各控件与程序中变量的链接来实现参数的读取与输入，因此本项目中的控件按其作用可以分为两类，一类是对变量数值的读取即为输出控件，另一类是对变量数值的改变即为输入控件。

在本项目中为了能够更清楚的观察电机的运动位置，设计了一个实时轨迹画面。画面是以一个白色矩形框为背景，画一横一竖两条线段作为 X、Y 两轴，在线段的交叉点再放置一个背景为红色的小圆圈，并将小圆圈设置为绝对运动且将其与程序中存储实时编码器位置值的变量链接上，后将此画面设置成一个组合，便完成了一个实时轨迹画面的设计。如图 4-3 为实时轨迹画面，坐标原点处的小红圈即可描绘出电机的实时运动轨迹。如图 4-4 为控件参数配置。在此，由于受到画面大小的限制，将 X、Y 两轴坐标值均缩小 1000 倍来显示。

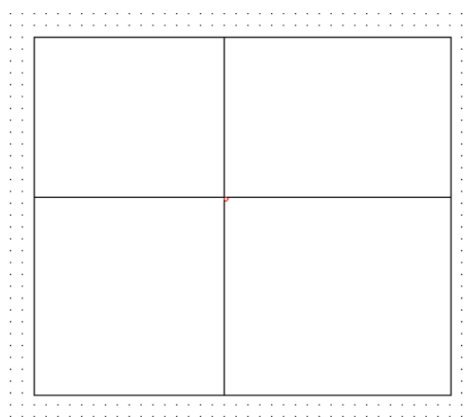


图 4-3 实时轨迹画面

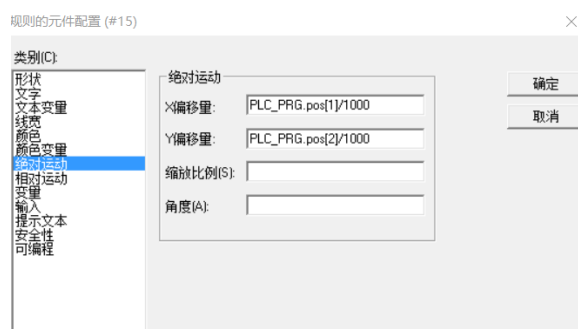


图 4-4 控件参数配置

除了设计实时轨迹画面之外，本项目还设计了一组速度、位置显示控件以及显示轨迹误差的趋势图。我们可以从速度、位置显示控件中清楚的获取两轴的速度、位置信息。该控件的配置与实时轨迹画面的配置类似，只不过是在文本显示变量处链接上存储速度、位置值的变量，并且在文本内容处限制所显示数据的位数，在此只显示小数点后两位。如图 4-5 为速度、位置显示控件及其参数配置图。

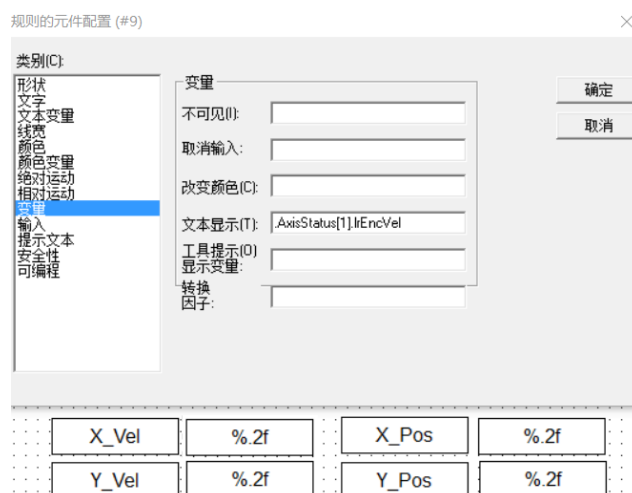


图 4-5 速度、位置显示控件及其参数配置图

为了便于观察轴运动过程中的轨迹误差变化情况，在可视化界面上设立了一个显示轨迹误差的趋势图。该图以时间为水平轴，以编码器的合成位置与坐标系规划位置的差值为垂直轴，其中垂直轴起始值为-70 个脉冲，主刻度为 10 个脉

冲，子刻度为 5 个脉冲。轨迹误差趋势图如图 4-6 所示。当程序运行时，图 4-6 横轴中“???” “???” “???” “???” “???” “???”处将显示系统的实时时间。

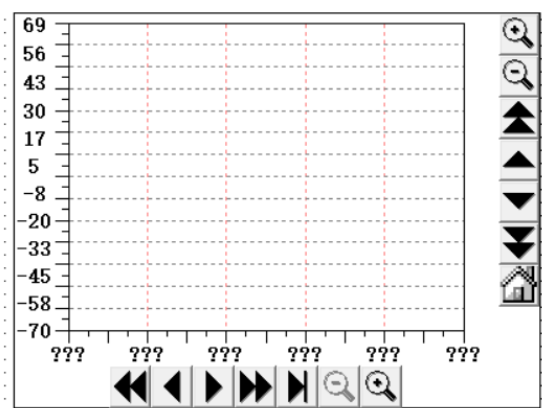


图 4-6 轨迹误差趋势图

以上控件均为输出性控件，本项目还设计了几个输入性控件。为了便于控制电机的运动，设计了一个上伺服的按钮 Start，一个停止按钮 Stop，以及六边形零件边长输入控件 side。每按下一次 Start 按钮，将会触发一次上伺服的变量，但并不保持变量，停止按钮也是如此。在 side 控件中输入数值，系统会将值赋给六边形零件边长变量。如图 4-7 为 Start、Stop 及 side 控件。图 4-8 为整体可视化界面的设计。

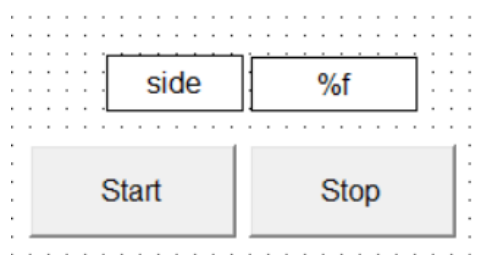


图 4-7 Start、Stop 及 side 控件

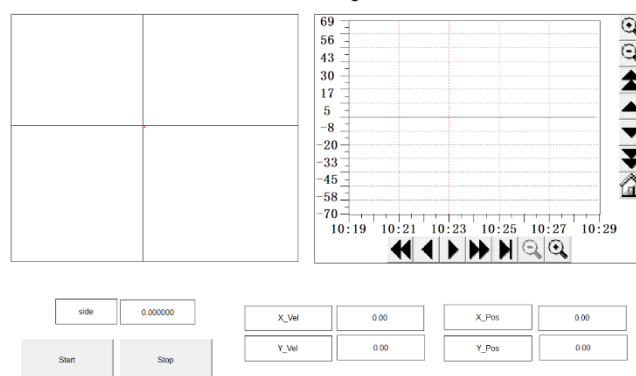


图 4-8 可视化界面的设计

## 4.2 结果分析

编写好程序且设计完可视化界面后，需对系统通信参数进行设置。首先，通

过示教器调取其通讯地址，后依据此通讯地址修改 Otostudio 软件的通信参数。如图 4-9 为示教器通讯地址，如图 4-10 为 Otostudio 软件通信参数的设置。

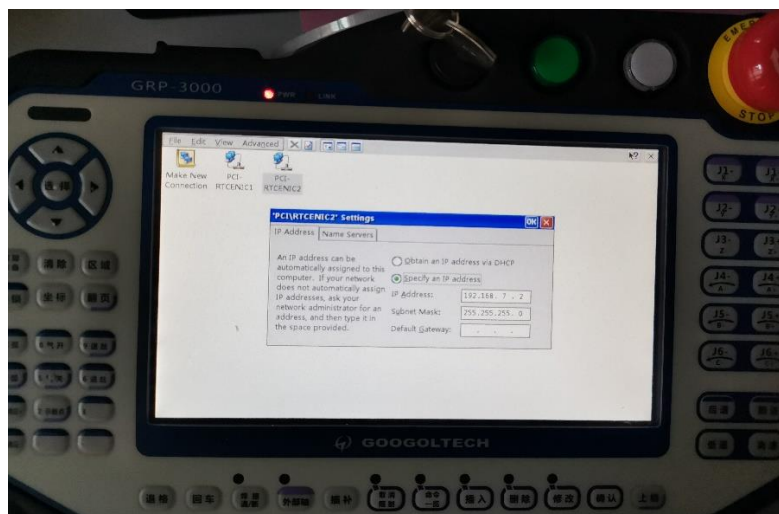


图 4-9 示教器通讯地址

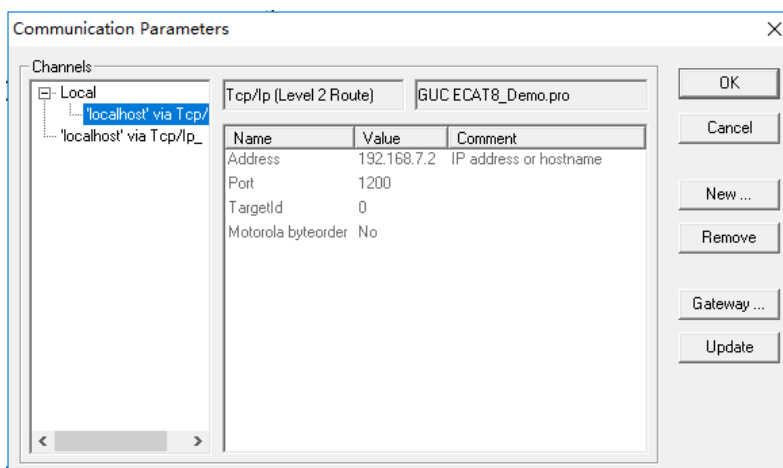


图 4-10 Otostudio 软件通信参数的设置

设置好通讯参数后，且程序编译无误，即可通过联机、登陆，将程序下载入嵌入式控制器中。

六边形零件插补运动结果如图 4-11 所示。圆形零件插补运动结果如图 4-12 所示。

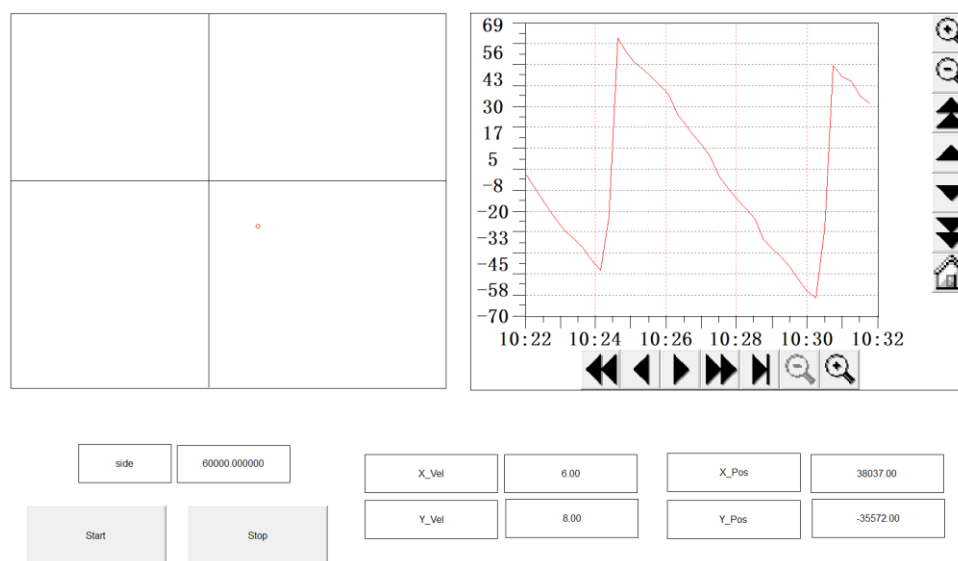


图 4-11 六边形零件插补运动结果

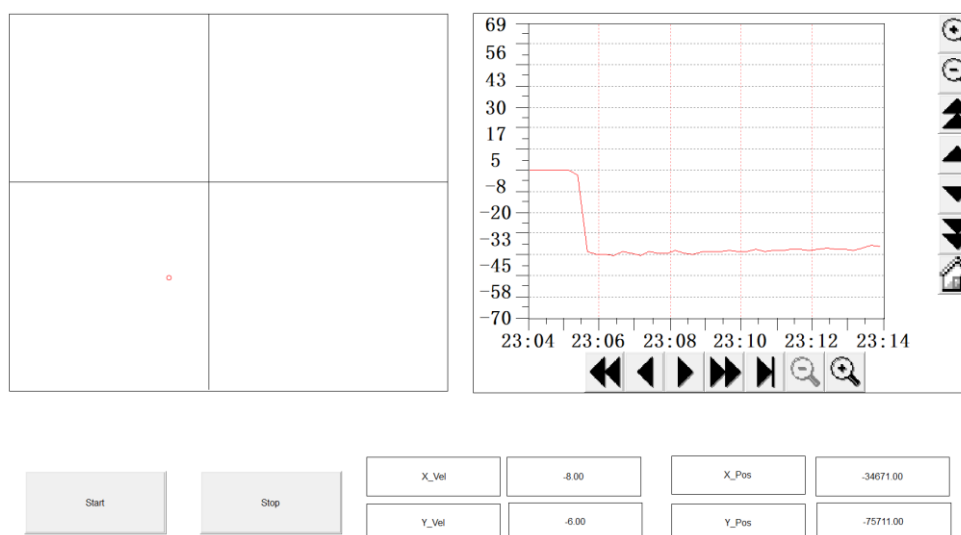


图 4-12 圆形零件插补运动结果

从图中我们可以看出实时轨迹画面中的小圆圈在不断移动，其连续轨迹大致为所设置的六边形及圆形。在小圆圈运动的同时，速度、位置显示控件也有数值上的变化且与小圆圈所在的位置一一对应。轨迹误差趋势图上也有图像的显示。六边形零件插补运动的误差在 $\pm 60$ 个脉冲范围内波动，圆形零件插补运动的误差在 $\pm 40$ 个脉冲范围内波动，误差均较小。但六边形零件的插补运动具有几处较大的误差波动，而圆形零件插补运动的误差整体较为平稳。通过观察六边形零件插补运动，得知几处误差较大的点均是伺服电机运动到零件的拐点处，而对比圆形误差趋势图，我们可以得知，当运动处于拐点时，误差可能会增大，且此误差增大的幅度与拐点角度以及运动速度有关。

总而言之，程序运行无误，且轨迹误差较小，成功实现了直线、圆弧的插补运动，并且可以通过人机交互界面对轴的运动进行控制以及对轴的运动状态进行监控。

### 4.3 本章小结

本章通过对插补运动控制程序、可视化界面的设计，并结合开放式可重构机器人开发平台的基础运动模式，完成了对六边形、圆形零件的轨迹描绘。程序运行无误，轨迹误差较小，可视化界面成功实现对电机运动的控制及状态的监控，基本满足项目设计构想，为后续在机器人开发平台上研究曲线、空间插补算法打下了坚实的基础。

## 第五章 总结与展望

本项目主要实现了对 CPAC 机器人开发平台的二次开发。在 CPAC 机器人开发平台能够采用点位运动模式控制两轴伺服电机运动的基础上，引入直线、圆弧插补运动，并以六边形零件、圆形零件为例进行了插补实验。主要研究工作总结如下：

1) 分析了 CPAC 机器人开发平台所具有的优势，同时对系统各轴参数、脉冲控制模式、编码器参数、闭环控制参数等系统参数进行了配置。

2) 对平面二自由度机器人进行了运动学分析。主要对机器人正逆运动学问题进行了求解。

3) 分析了逐点比较直线、圆弧插补的原理，并结合分析过程，使用 MATLAB 软件对插补进行了仿真验证。通过仿真结果可以得出实际运动轨迹在一定运动范围内贴近规划轨迹，并且这个运动范围不超过一个步长，为其能够精确控制两轴伺服电机的运动提供了可能。

4) 基于机器人开发平台的点位运动模式，引入了直线、圆弧插补运动，实现了对六边形、圆形零件的轨迹描绘。

5) 开发了人机交互界面，具有简洁明了的特点。从而更便于用户对伺服电机的控制以及对伺服电机运动状况的监控。

本项目目前只是对机器人开发平台进行了初步的二次开发，结合工业机器人未来更加开放化、更加智能化的趋势以及工件轮廓越来越复杂等情况，还需对开放式机器人开发平台进行进一步探索：

1) 对机器人曲线、空间插补算法进行进一步的研究，以应对工件精巧复杂化的趋势。

2) 改进人机交互界面。随着工业机器人的功能越来越完善，人机交互界面的设计也应得到优化。

## 参考文献

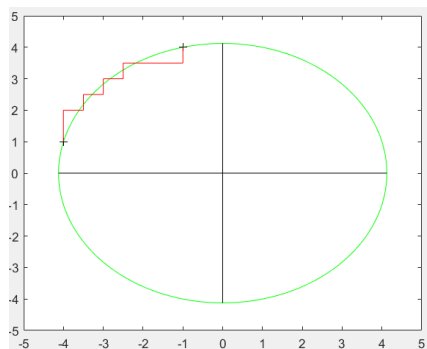
- [1] 冀亮亮, 吕娟娟. 工业机器人在现代制造行业中的应用[J]. 科技风, 2020(07):21.
- [2] 冯旭, 宋明星, 倪笑宇, 马立勇, 王少雷. 工业机器人发展综述[J]. 科技创新与应用, 2019(24):52-54.
- [3] 陆昱方. 综述智能机器人的发展与组成[J]. 通讯世界, 2019,26(01):305-306.
- [4] 王哲, 冯晓辉, 李艺铭, 庄金鑫. 智能机器人产业的现状与未来[J]. 人工智能, 2018(03):12-27.
- [5] 汪诘. 智能制造: 机器人发展的重要推手[J]. 资源再生, 2020(01):64-66.
- [6] Tian-Miao Wang, Yong Tao, Hui Liu. Current Researches and Future Development Trend of Intelligent Robot: A Review[J]. International Journal of Automation and Computing, 2018, 15(05):525-546.
- [7] 陈启愉, 吴智恒. 全球工业机器人发展史简评[J]. 机械制造, 2017, 55(07):1-4+19.
- [8] 钟骅. 多角度观察中国制造业现状与趋势——第四次全国经济普查和中国企业综合调查结果简析[J]. 中国工业和信息化, 2020(Z1):21-27.
- [9] 我国工业机器人产量占全球 1/3 核心零部件自主研发能力提升[J]. 智能机器人, 2018(05):18.
- [10] 宋晓刚, 姚之驹. 中国工业机器人跨越式发展下的三大困难[J]. 机器人产业, 2015(01):40-45.
- [11] 田闯. 工业机器人的现状及发展趋势研究[J]. 中国管理信息化, 2019, 22(20):156-157.
- [12] Zhang Ruishu, Zhang Chang, Zheng Weigang. The status and development of industrial robots[C]. 2018, 423(1)
- [13] 牟海荣. 工业机器人运动控制分析与研究[J]. 电子技术与软件工程, 2018(23):115-117.
- [14] 张艳玲. 工业机器人技术在自动化控制领域的实践[J]. 科学咨询(科技·管理), 2019(12):89.
- [15] 刘海鹏. 工业机器人开放式控制系统的结构特点与应用研究[J]. 南方农机, 2019, 50(22):196.
- [16] Linn D. Evjemo, Tone Gjerstad, Esten I. Grøtli, Gabor Sziebig. Trends in Smart Manufacturing: Role of Humans and Industrial Robots in Smart Factories[J]. Current Robotics Reports, 2020, 1(2013).
- [17] 吕冬冬, 郑松. 工业机器人开放式控制系统研究综述[J]. 电气自动化, 2017, 39(01):88-91.
- [18] 肖凡. 基于 CPAC 的六自由度工业机器人控制系统设计与实现[D]. 湖南工业

大学, 2019.

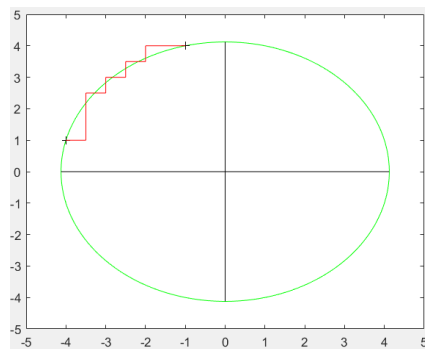
- [19] 舒晓春, 黄小玲, 祝闰红. 一种针对逐点比较法直线插补的优化算法[J]. 济宁学院学报, 2018,39(05):4-8.

## 附录 1

$(-4, 1)$   $(-1, 4)$  间

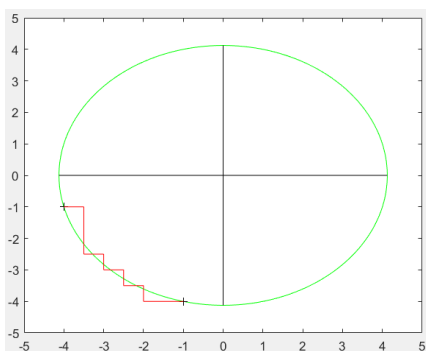


逆圆

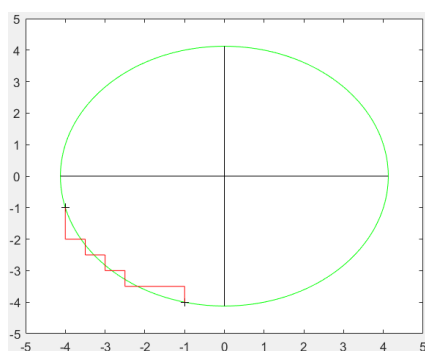


顺圆

$(-4, -1)$   $(-1, -4)$  间

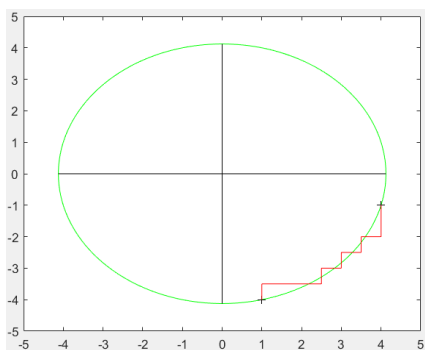


逆圆

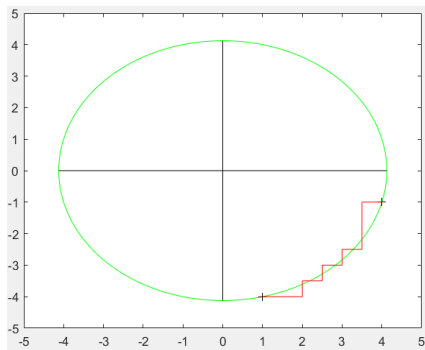


顺圆

$(4, -1)$   $(1, -4)$  间



逆圆



顺圆

附图 1 第二、三、四象限圆弧插补仿真结果

## 附录 2

部分运动控制程序：

Updata(PRG)

FOR i:= 1 TO 4BY 1 DO

```

    rtn:= GT_GetSts(i, ADR(AxisStatus[i].dwStatus), 1, 0);
    rtn:= GT_GetPrfPos(i, ADR(AxisStatus[i].lrPrfPos), 1, 0);
    rtn:= GT_GetEncPos(i, ADR(AxisStatus[i].lrEncPos), 1, 0);
    rtn:= GT_GetPrfVel(i, ADR(AxisStatus[i].lrPrfVel), 1, 0);
    rtn:= GT_GetEncVel(i, ADR(AxisStatus[i].lrEncVel), 1, 0);
    AxisStatus[i].bAlarm:= AxisStatus[i].dwStatus.1;
    AxisStatus[i].bMotion:= AxisStatus[i].dwStatus.10;
    AxisStatus[i].bNegativeLimit:= AxisStatus[i].dwStatus.6;
    AxisStatus[i].bPositiveLimit:= AxisStatus[i].dwStatus.5;
    AxisStatus[i].bServoON:= AxisStatus[i].dwStatus.9;
    AxisStatus[i].bOverErrLimit:= AxisStatus[i].dwStatus.4;

```

END\_FOR

PLC\_PRG(PRG)

(\*第一步：设置插补坐标系参数\*)

(\*加载插补参数\*)

IF bSetCrdPrm THEN

```

    crdPrm.dimension:=2; (*二维坐标系*)
    crdPrm.synVelMax:=500;
    crdPrm.synAccMax:=1;
    crdPrm.evenTime:=50;
    crdPrm.profile[0]:=AXIS_X; (*轴一为 X*)
    crdPrm.profile[1]:=AXIS_Y; (*轴二为 Y*)
    crdPrm.setOriginFlag:=1;
    crdPrm.originPos[0]:=0; (*坐标系原点以轴的零位为原点*)
    crdPrm.originPos[1]:=0;
    rtn:=GT_SetCrdPrm(1,ADR(crdPrm));
    bSetCrdPrm:=FALSE;

```

END\_IF

(\*第二步：计算正六边形各顶点坐标，并压入轨迹数据。启动\*)

IF bLnStart THEN

(\*上伺服\*)

```

rtn:= GT_ClrSts(AXIS_X, 1);
rtn:= GT_GetSts(AXIS_X, ADR(Sts), 1, 0);
rtn:= GT_AxisOn(AXIS_X);
rtn:= GT_ClrSts(AXIS_Y, 1);
rtn:= GT_GetSts(AXIS_Y, ADR(Sts), 1, 0);
rtn:= GT_AxisOn(AXIS_Y);
rtn:=GT_CrdClear(1,0);
rX[1]:=rSide;
rY[1]:=0;
rX[2]:=rSide/2;
rY[2]:=rX[2]*TAN(45);
rX[3]:=-rSide/2;
rY[3]:=rSide/2*TAN(45);
rX[4]:=-rSide;
rY[4]:=0;
rX[5]:=-rSide/2;
rY[5]:=-rSide/2*TAN(45);
rX[6]:=rSide/2;
rY[6]:=-rSide/2*TAN(45);
FOR i:=1 TO 6 BY 1 DO
rtn:=GT_LnXY(1,REAL_TO_DINT(rX[i]),REAL_TO_DINT(rY[i]),10,0.1,
0,0);
END_FOR
rtn:=GT_LnXY(1,REAL_TO_DINT(rX[1]),REAL_TO_DINT(rY[1]),10,0.1,
0,0);
rtn:=GT_CrdSpace(1,ADR(space),0);
(*启动插补运动*)
rtn:=GT_CrdStart(1,0);
bLnStart:= FALSE;
END_IF
(*GT_GetEncPos(2,ADR(pos[1]),1,ADR(pClock));
GT_GetEncPos(3,ADR(pos[2]),1,ADR(pClock));*)
(*采集插补位置，在界面显示以红色小圆圈的移动来展示。配置，绝对运动
里面配置移动坐标的大小*)
rtn:=GT_GetCrdPos(1,ADR(pos));

```

```
(*轨迹误差=编码器合成的位置减去坐标系规划位置*) (*在趋势图中显示*)
errBand:=SQRT(EXPT(AxisStatus[1].lrEncPos,2)+EXPT(AxisStatus[2].lrEncPos,2))-SQRT(EXPT(pos[1],2)+EXPT(pos[2],2));
(*自动补偿误差。即当有误差产生时，给追加一个点位运动来弥补误差。*)
IF ABS(errBand) >=40 THEN (*当误差值大于 40 时补偿*)
  (*x 方向误差*)
  pos1:=AxisStatus[1].lrEncPos-AxisStatus[1].lrPrfPos;
  (*y 方向误差*)
  pos2:=AxisStatus[2].lrEncPos-AxisStatus[2].lrPrfPos;
  MoveRelative(
    3,
    100,
    100,
    0,
    0,
    100,
    -LREAL_TO_DINT(pos1),
    AxisStatus[3]);
  MoveRelative(
    4,
    100,
    100,
    0,
    0,
    100,
    -LREAL_TO_DINT(pos2),
    AxisStatus[4]);
END_IF
```

## 致谢

时光似流水，缓缓而又悄无声息的从我身边流过，四年大学时光无论多么不舍都终要画上句号。而我所能做的，便是在这最后的阶段，将这最后的句号毕业论文完成好。无论是课题的选题还是框架的搭建都离不开指导老师的关怀教导、朋友同学间的互帮互助以及自己的点点积累与努力。

在这论文定稿的最后阶段，借此时机向帮助过我的指导老师、朋友同学致以真挚的感谢。

首先最想感谢的是我的指导老师邵欣老师。邵老师是位知识非常渊博，教学耐心而又细致的教师，在大学四年里给予我极大的关怀及知识上的教导。在毕设初期，邵老师在忙碌的工作之中，抽出时间指导我们课题的选择，督促我们进实验室完成课题；在疫情期间，在工作与家人之间来回奔波的邵老师还经常通过微信等网络工具询问我们论文的撰写情况并帮助我们解决疑难问题、指导论文撰写修改等。在这，我想向邵老师真挚的说一声谢谢您老师，老师您辛苦啦！

此外也感谢同一个实验室的王崇超、沈琦、李梦月、张灵旺等同学朋友们在课题研究期间相互交流心得，互相督促提醒完成既定任务，有幸能够遇见你们。

最后感谢四年来陪伴我们的老师，是你们辛勤的付出，为我们打下坚实的专业基础，为我们未来的发展创造了更好的条件。同时也要感谢这四年来对我鼓励、支持与帮助的家人。