



沈阳师范大学  
Shenyang Normal University

博学厚德  
尚美健行

# 课程教案

课程名称：《计算机控制技术》

课程代码：08301281

课程类别：专业选修

学时/学分：54 学时 3 学分

授课学期：2023-2024-2

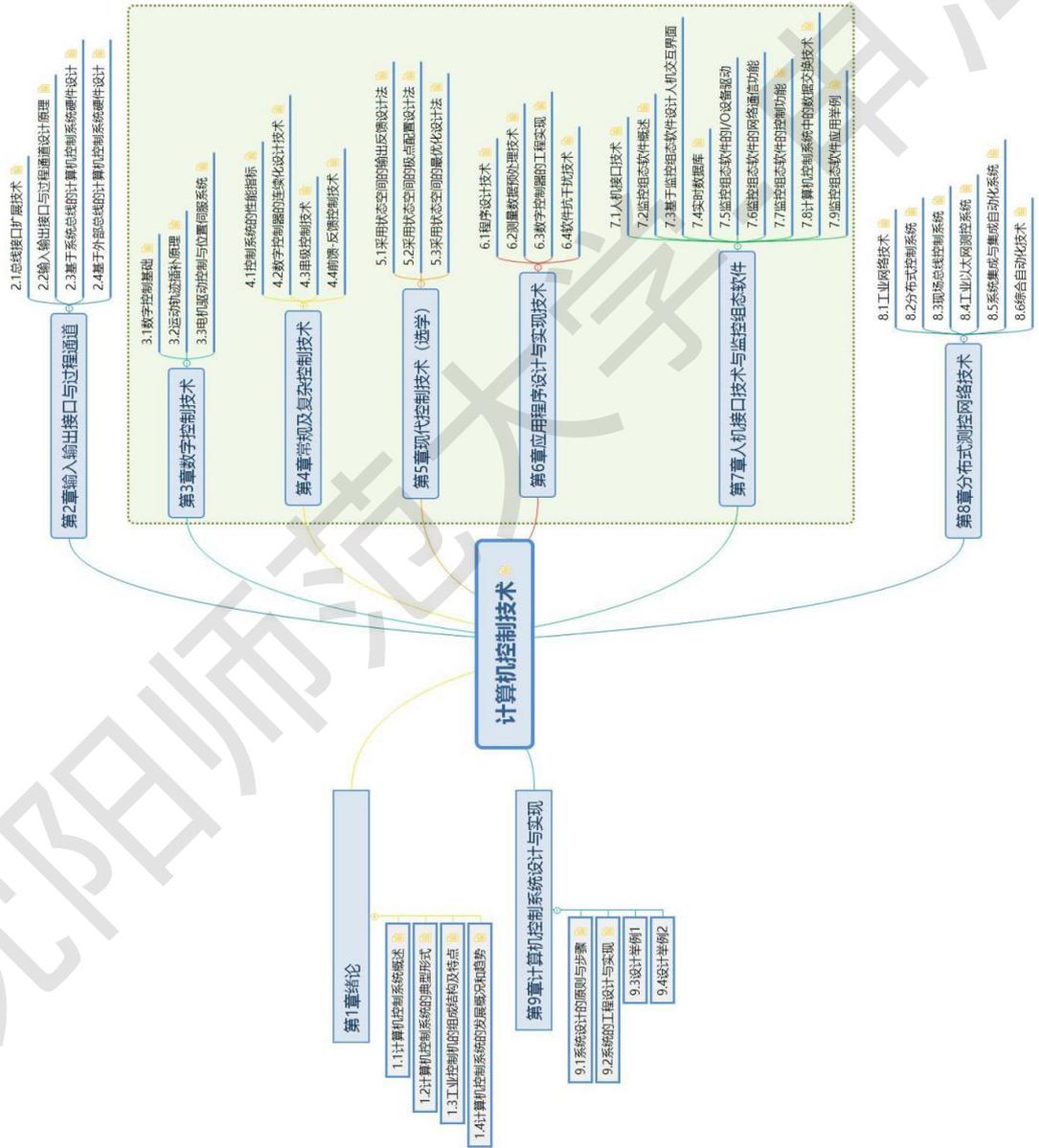
授课对象：2021级电子信息工程专业

授课教师：申海

开课单位：物理科学与技术学院

课程 基本 情况	课程名称	计算机控制技术	课程代码	08301280
	授课对象	电子信息工程专业	课程性质	选修课
	学时	54 (36/18)	学分	3
	考核方式	考查。实行过程性考核，由线上成绩（签到、任务点学习情况、测验、作业等）、实验成绩和期末测试成绩共同组成。		
教材 及 参考 资料	<p>(1) 主要采用教材</p> <p>《微型计算机控制技术》(第3版) 于海生等著清华大学出版社 2017年5月 (国家精品课程配套教材,“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材)</p> <p>(2) 辅助教材</p> <p>《计算机控制技术及其应用》丁建强 清华大学出版社 2017年2月 (教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会规划教材)</p> <p>(3) 辅助教材</p> <p>《计算机控制技术》(第2版)于海生等著机械工业出版社 2016年11月 (普通高等教育“十一五”国家级规划教材)</p> <p>参考书:</p> <p>《计算机控制技术》刘川来等著 机械工业出版社 2015年2月</p> <p>《计算机控制技术》顾德英等著 北京邮电大学出版社 2012年6月</p> <p>《计算机控制系统》张德江等著 机械工业出版社 2007年8月 (本课程第二阶段教学采用教材)</p> <p>《实用微机与单片机控制技术》陈汝全等著 电子科技大学出版社 1998年9月 (本课程第一阶段教学(最早期教学)采用教材)</p>			
教学 内容	<p>本课程是将前序多个电子信息类课程的内容进行了应用层面的整合，是一门综合性非常强的课程。主要介绍计算机控制的基本理论知识及实现方法，具体教学内容包括控制系统的构成及分类、过程通道构成原理及设计方法，控制策略原理及设计方法、控制系统软件设计方法和控制网络的分类及设计方法，系统设计原则及设计过程等等。通过上述教学内容的学习，实现学生设计出满足控制系统控制要求和性能指标要求的计算机控制系统这一课程教学目标。</p> <p>本课程教学内容包含计算机控制系统设计所需的硬件、软件、通信和系统共四方面知识，内容全面且有深度。具体章节思维导图如下，其中：</p>			

- 第一章：概述；
- 第二章：硬件方面介绍；
- 第三章、第四章和第五章：控制技术和控制策略介绍；
- 第六章和第七章：软件设计介绍；
- 第八章：网络设计介绍；
- 第九章：系统整体设计介绍。



教学  
目的

总体说明：

坚持立德树人，培养学生正确的人文素养，科学素养和工程素养。通过本

课程的学习，使学生掌握计算机控制系统设计的基本理论知识、控制方法、控制原理和控制策略等内容；同时受到较好的工程实践训练，能够对控制系统的进行软件编写和硬件设计；并具备对复杂工程问题进行设计及开发能力，包括研究、分析、设计和开发的综合能力，为学生后续的学习和工作打下坚实基础，并为专业培养目标中的应用型人才培养奠定基础。

目标 1（人文素养）：

通过介绍控制技术领域名人名事和中国制造的发展史等内容，培养学生树立正确的世界观、人生观和价值观，保持辩证唯物主义观点，激发学生的爱国情怀和创新精神，以及为祖国振兴做贡献意识。

目标 2（工程素养，职业素养和科学素养）：

通过课堂讲授、实践训练并结合教学中讨论等环节，渗透科学素养和工程素养的培养。培养学生实事求是的科学态度，对待科学工作保持认真严谨和探索创新精神，遵守工程职业规范与良好职业道德，具备团结协作和积极向上精神。

目标 3（知识）：

通过课程讲授与项目式训练，使学生掌握计算机控制技术的基础理论知识，包括计算机控制原理、典型形式、常规控制策略和复杂控制策略、数据处理方法、过程通道技术、数字控制技术，网络化控制系统基本知识、控制系统硬件电路模块及实验方案，系统总体设计原则和设计步骤。

目标 4（基本能力）：

结合配套课程实验和项目训练，能够使用工业辅助软件设计控制策略并进行实际应用，包括使用组态软件开发计算机监控系统，使用 MATLAB 软件模拟控制过程和分析控制效果等。能够搭建计算机控制硬软件实验系统、进行开发和测试，通过过程通道采集实验数据、分析数据、通过控制策略、最终输出控制信号。

目标 5（复杂问题能力）：

通过计算机控制在实际生产中应用的复杂工程项目训练，培养学生从需求出发，针对计算机控制领域复杂控制问题提出的系统功能、性能指标和设计目标，基于整体到细化、化繁为简的思想，进行研究、定义与分析，制定控制系

	统方案，并设计开发满足特定需求的控制系统，以提高学生分析复杂问题和解决复杂问题的能力。	
<b>教学内容学时分配</b>		
<b>章次</b>	<b>内容</b>	<b>学时（对应教案）</b>
第一章	绪论	4（第1次、第2次）
第二章	输入输出接口与过程通道	6（第3-5次）
第三章	数字控制技术	10（第6-10次）
第四章	常规及复杂控制技术	8（第11-15次）
第五章	现代控制技术	0（学时有限，此部分不学）
第六章	应用程序设计与实现技术	4（第16次、第17次）
第七章	人机接口技术与监控组态软件	12（第18-23次）
第八章	分布式测控网络技术	2（第24次、第25次）
第九章	计算机控制系统设计与实现	6（第26次、第27次）
<b>本课程教学方法与手段</b>		
<p>本课程在每章开始之前都进行复习/导入式学习，然后再进入新课授课环节，每章最后都进行知识点小结。本课程教案是课堂上 PPT 教学的指挥棒，PPT 负责传授具体知识内容，教案说明课堂教学内容的教学顺序和方式方法，两者相辅相成进行课堂授课。</p> <p>（1）教学方法</p> <p>① 整体说明：本课程采用课堂讲授法、启发式、任务驱动式、互动讨论式和案例分析等多种教学方法。</p> <p>② 采用启发式和任务驱动式教学方法：激发学生主动学习的兴趣，引导学生主动通过实践和自学获得相应的知识，培养学生自己的知识体系，提高独立思考、分析问题和解决问题的能力。</p> <p>③ 采用互动式教学方法：课内课堂提问、课内小组讨论和课外答疑相结合，培养学生表达和团队协作、以及自学习的能力。</p> <p>④ 采用案例分析教学方法：将理论教学与工程实践相结合，以典型工业控制案例为载体，引导学生将工艺需求分析、硬件架构分析和软件设计等内容进行整体有机融合，提高学生项目分析能力和综合设计能力。</p> <p>（2）教学手段</p> <p>① 本课程充分利用信息技术手段，如采用多媒体 PPT 课件进行教学，以提高课堂</p>		

教学信息量，优化教学过程，提高教学效率。

② 本课程工程性较强，将复杂工程知识点采用虚拟教学法进行教学，将静止内容动态化，抽象思维直观化，以增强教学直观性，提高课堂教学效果。

③ 现代信息技术与传统板书结合方法。

④ 网络教学资源平台，包括课件，教学大纲，教学日历，作业，习题库等信息。利用网络教学资源辅助课堂教学。

沈阳师范大学-申海

# 教案设计思路

授课章节	确定教学内容	
教学目的及要求	明确教学目的及要求	
教学重点与难点	明确教学重点	
	明确教学难点	
教学方法	<p>（每节课可采用如下一种或几种教学方法进行教学，多措并举。）</p> <p>讲授法、多媒体演示法、案例分析法、情景导入法、任务驱动法、启发式教学法、探究式教学方法、微视频法、翻转课堂和讨论法等教学方法。</p>	
教学手段	<p>1.多媒体教学</p> <p>2.板书</p> <p>3.信息化教学：线上教学平台。</p>	
混合式教学模式 (每次课程都采用混合式教学模式) (注：后续教案此处仅说明课前教学任务单；课后作业内容在总结与作业里进行说明。)	<p>1.课前：为课中教学打下基础。</p> <p>使学生提前获取知识，并培养独立思考能力。同时能让教师了解学生对新课内容的认知程度，为课中教学打下基础。</p> <p><b>【教师】</b>教师在线上平台上传教学课件、微视频、讨论问题、文档资料、课前练习和调查问卷等内容，同时发布教学任务单，供学生进行复习和预习。</p> <p><b>【学生】</b>学生根据教师新课学习教学任务单，进行课前复习或预习。</p> <p>2.课中：进行新课内容的讲授。</p> <p><b>【教师】</b>线下进行具体精讲，包括复习/导入、新课授课、随堂练习、总结与作业等教学环节。</p> <p><b>【学生】</b>线下进行学习。</p> <p>3.课后：巩固及加深所学知识。</p> <p><b>【教师】</b>在线上平台发布课后作业及拓展阅读等内容，供学生学习。</p> <p><b>【学生】</b>在线上平台完成课后作业和拓展阅读等学习内容，或其他学习任务点，巩固所学知识。</p>	
教学环节	教学过程	教学设计

<p>签到 (每次课程必备环节) (注:后续教案不在标注此环节)</p>	<p>【教师】在线上平台发布签到通知 【学生】在线上平台进行签到</p>	<p>帮助学生更快进入课堂的氛围中,同时增加责任感和职业素养。</p>
<p>【复习/导入】 (每次课程必备环节) (注:每次课根据教学安排,设计复习环节、导入环节或是复习+导入环节。)</p>	<p>复习环节:一般采用温顾型提问法复习或教师讲授式复习。 【教师】提问。基于线上平台选人或抢答方式进行提问。 【学生】思考并回答 【教师】讲授法复习 【学生】听课 导入环节:一般采用创设情景型提问法或教师讲授法导入。 【教师】提问基于线上平台选人或抢答方式进行提问。 【学生】思考并回答 【教师】讲授法导入 【学生】听课</p>	<p>复习环节:巩固和加深了上次课内容,为本节教学打下了良好的知识储备和能力储备。 导入环节:引发学生进行思考,激发学生的探究欲望,发动学生主动地参与学习过程。</p>
<p>新课授课 (每次课程必备环节,可包含如下环节:新知识讲解、师生互动、随堂练习、课程思政、拓展案例、等等。) (注:根据不同教学</p>	<p>新知识讲解 【教师】讲授 【学生】听课 师生互动 【教师】提问或列出讨论内容 【学生】回答或讨论 随堂练习 【教师】发布练习题(线上或线下) 【学生】完成练习题 【教师】点评</p>	<p>【师生互动】使学生亲身参与教学过程,培养独立思考能力。 【随堂练习】巩固所学知识,并检验学生课堂学习效果。 【课程思政】基于知识点融入思政教育,整体起到立德树人教学目的。 【拓展案例】巩固和提升</p>

<p>内容，采用不同的教学环节。)</p>	<p><b>【学生】</b>修正课程思政</p> <p><b>【教师】</b>基于知识点融入思政教育</p> <p><b>【学生】</b>接受教育</p> <p>拓展案例</p> <p><b>【教师】</b>拓展案例说明</p> <p><b>【学生】</b>学习、讨论或探究</p>	<p>所学知识/加深学生对知识的理解和升华/培养学生对知识的运用能力/开阔学生视野,培养创新思维。</p>
<p>总结及作业 (每次课程必备环节) (注:后续教案不在标注具体教学活动及作用,仅标注总结内容和作业内容)</p>	<p>总结:帮助学生理清所学知识的层次结构,掌握其外在的形式和内在联系,形成一定的知识结构框架。</p> <p><b>【教师】</b>简明扼要,提纲挈领性的总结本次课程内容。</p> <p><b>【学生】</b>对新知识再一次高效学习和记忆。</p> <p>作业:检查学生学习效果;加深和巩固对知识的理解;促使学生积极思考和主动思考。</p> <p><b>【教师】</b>线上平台发布作业</p> <p><b>【学生】</b>线上平台完成作业</p>	
<p>板书</p>	<p>1.板书体现方式。浓缩教学内容,突出重点难点,形成知识结构。要具有目的性、针对性、概括性、条理性和计划性。</p> <p>2.板书作用。帮助实现教学目的,体现教学意图;激发学生学习兴趣,集中学生精力;建立教学信息系统,易于巩固记忆;引导学生学习思路,便于探求;强化直观教学形象,增强教学效果。</p>	
<p>拓展阅读</p>	<p>1.通过拓展阅读加深学生对课内知识的进一步了解,同时拓展学生视野。</p> <p>2.引导学生读书,培养获取信息、加工和表达信息的能力。</p>	
<p>教学反思</p>	<p>1.反思教学活动,寻找不足和缺陷,并进行再次教学设计思考。</p> <p>2.反思教学活动,寻找教学优势所在,总结教学规律。</p>	

# 第一部分 单元整体说明

## 教学内容分析

本章节内容选自《计算机控制技术》教材第3章，本单元教学内容在其教材原有内容上进行了重构，讲授了关键的知识内容，共计6学时；同时，本单元教学内容与工程应用相结合，增加了4学时实验内容，实现了理论与实践的结合。

本单元知识内容共分为3节，通过3节内容使学生对数控技术进行基本了解，并掌握关键技术及其实现方法。3小节内容具有递进性和关联性，需要学生逐层级的进行学习，从而系统性的掌握本单元内容。另外，本章节知识涉及的应用方面为工程应用，因此要求学生对工程背景熟记于心，使得知识点的学习有对照应用点，从而实现理论与工程实践的结合。

理论1（2学时）：3.1 数字控制基础：数字控制基本知识讲授

理论2（2学时）：3.2 运动轨迹插补原理-直线插补：数字控制关键技术讲授

理论3（2学时）：3.2 运动轨迹插补原理-圆弧插补：数字控制关键技术讲授

实验1（2学时）：逐点比较法直线插补：实现数字控制关键技术的软件部分内容讲授

实验2（2学时）：逐点比较法圆弧插补：实现数字控制关键技术的软件部分内容讲授

## 教学目标说明

### 知识目标

- 1.了解数字控制的发展及应用情况，掌握数字控制技术概念及组成；理解数字控制原理；了解数字控制方式类别，数字控制系统分类及各类特点，数控系统分类及应用；
- 2.掌握逐点比较法插补原理，直线插补和圆弧插补的具体插补过程；熟悉插补计算程序实现流程。

### 能力目标

- 1.能根据插补目标点，进行插补计算；
- 2.能根据控制要求，研究及设计步进电机控制字；
- 3.能够在计算机环境中完成逐点比较法直线插补的和圆弧插补程序编写，并实现插补计算。

### 素养目标

- 1.通过数控产品介绍，厚植爱国精神与创新精神，鼓励学生创造人生价值，报效祖国；
- 2.通过插补计算，培养学生锲而不舍，一丝不苟的工匠精神；
- 3.通过实验操作，培养学生坚韧不拔的进取精神，同时在解决具体疑难问题可以及时跟老师或组长进行沟通，培养高效沟通的职业素养。

## 学情分析

### 知识方面

- 1.了解计算机控制技术的应用领域，这对本章知识内容的应用领域进行了一定的铺垫；
- 2.前面章节没有与数字控制技术相关内容；

**能力方面**

- 1.通过本课程前述章节的讲解，具备理解工程知识新应用背景的能力。
- 2.学生第3学期学习了 matlab 软件，可基于此仿真软件进行基本操作。

**素养方面**

- 1.喜欢借助微课和仿真软件等信息化教学手段进行学习。
- 2.渴望学习和未来工作岗位相关的知识和技能，对工程项目案例表现出一定的好奇心。

**教学评价策略****过程参与度**

- 1.线下听课情况；
- 2.线上平台问卷完成情况；
- 3.线上平台学习内容完成情况。

**知识掌握度**

- 1.课堂提问；
- 2.线上平台小节测验；
- 3.线上平台.章末测试。

**技能熟练度**

- 1.课堂基础实验；
- 2.课堂拓展实验；
- 3.课外加深实验。

**素养达成度**

- 1.课程签到；
- 2.课堂交流沟通情况；
- 3.线上平台讨论题完成情况；
- 4.线上平台思政内容学习情况等。

各节教学目的及要求	教学内容	具体内容
<b>3.1 数字控制基础</b> 教学目的及要求： 1.了解数字控制的发展及应用情况，掌握数字控制技术概念及组成； 2.理解数字控制原理； 3.了解数字控制方式类别，数字控制系统分类及各类特点，数控系统分类及应用； 4.通过介绍我国数控产品发展，厚植学生爱国精神与创新精神，增强民族自信。	3.1.1 数控技术介绍	1.数字控制技术定义及应用领域 2.数字控制技术发展概况 3.数控系统组成
	3.1.2 数字控制原理	数字控制原理
	3.1.3 数字控制方式	数字控制方式
	3.1.4 数字控制系统	数字控制系统
	3.1.5 数控系统分类	数控系统分类

<p><b>3.2 运动轨迹插补原理</b></p> <p>教学目的及要求：</p> <p>1.掌握逐点比较法插补原理，直线插补和圆弧插补的具体插补过程；</p> <p>2.能根据插补目标点，进行插补计算；</p> <p>3.分析直线或圆弧插补程序流程；</p> <p>4.通过插补计算，培养学生锲而不舍，一丝不苟的工匠精神。</p>	<p>3.2.1 逐点比较法的直线插补</p>	<p>1.第一象限内的直线插补</p> <p>2.4个象限的直线插补</p> <p>3.逐点比较法的直线插补程序流程</p>
<p><b>实验一、逐点比较法直线插补</b></p> <p>实验目的</p> <p>1.进一步理解逐点比较法直线插补原理；</p> <p>2.能够在计算机环境中完成逐点比较法直线插补的程序编写，并实现插补计算；</p> <p>3.通过实验操作，培养学生坚韧不拔的进取精神，同时在解决具体疑难问题可以及时跟老师或组长进行沟通，培养高效沟通的职业素养。</p>	<p>3.2.2 逐点比较法圆弧插补</p>	<p>1.第一象限内的圆弧插补</p> <p>2.4个象限的圆弧插补</p> <p>3.逐点比较法的圆弧插补程序流程</p>
<p><b>实验二、逐点比较法圆弧插补</b></p> <p>实验目的</p> <p>1.进一步掌握逐点比较法圆弧插补原理；</p> <p>2.能够在计算机环境中完成逐点比较法圆弧插补的程序编写，并实现插补计算；</p> <p>3.通过实验操作，培养学生坚韧不拔的进取精神，同时在解决具体疑难问题可以及时跟老师或组长进行沟通，培养高效沟通的职业素养。</p>	<p>实验任务：</p> <p>1.任务一：根据逐点比较法原理，编写第一象限逐点比较法直线插补程序；</p> <p>2.任务二：根据逐点比较法原理，编写其他象限逐点比较法直线插补程序。</p>	<p>实验任务：</p> <p>1.任务一：根据逐点比较法原理，编写第一象限逐点比较法圆弧插补程序；</p> <p>2.任务二：根据逐点比较法原理，编写其他象限逐点比较法圆弧插补程序。</p>

## 第二部分 教案详情

授课章节 3.1 数字控制基础				
授课学时	2 学时		授课类型	理论课
教学目的及要求	1.了解数字控制的发展及应用情况，掌握数字控制技术概念及组成； 2.理解数字控制原理； 3.了解数字控制方式类别，数字控制系统分类及各类特点，数控系统分类及应用； 4.通过介绍我国数控产品，厚植学生爱国精神与创新精神，增强民族自信。			
教学重点与难点	教学重点：数字控制技术应用			
	教学难点：数字控制原理			
教学方法	1.理论讲授与多媒体演示相结合 2.微课视频法 3.启发式教学方法			
教学手段	1.多媒体教学 2.板书 3.信息化教学：线上教学平台（观看微视频，提问，签到等）。			
教学实施过程				
教学环节	教学内容	教师活动	学生活动	设计意图
课前	课前学生预习，尝试理解数字控制技术的应用情况 1.了解第三章学习目标，学习进度等内容； 2.了解 3.1 节学习目标，学习重难点等内容； 3.提前了解数控技术。 4.掌握学生对数控技术的熟悉情况。	1.线上平台发布第三章学习目标，学习进度等内容； 2.线上平台发布 3.1 节电子教材，学习目标，学习进度等内容； 3.线上平台发布秒懂百科“数控技术”微视频； 4.线上平台发布“数控系统介绍”微视频；	1.学生在线上平台了解第三章学习目标，学习进度等内容； 2.学生在线上平台了解 3.1 节学习目标，学习进度等内容； 3.收看线上平台秒懂百科“数控技术”微视频； 4.收看线上平台“数控系统介绍”微视频；	1.让学生了解第三章及 3.1 节学习目标，学习要求及学习重难点等内容； 2.通过两个微视频的收看，让学生提前形成对新课内容的粗略直观认识，便于更好的开展课堂教学； 3.通过调查问卷，使老师了解

			5.发布“数控技术的应用”调查问卷。	5.完成“数控技术的应用”调查问卷。	学生对数控技术应用情况的了解程度。
	<b>思 1</b> 课程导入（10分钟）	3.1.1 数字控制技术介绍 1.熟悉数字控制技术应用情况； 2.了解数控技术学习的重要性。 3.了解数字控制的发展概况，掌握数字控制技术概念及组成； 4.检验学生学习的3.1.1节内容的基本情况。	1.提问 1:通过课前微视频的学习，那么了解了机械零件是如何产生的吗； 2.通过学生的回答，教师总结数控技术在工业的应用情况，并再一次播放数控技术加工零件的视频； 3.说明学习数控技术的重要性及本章内容学习的重要性。 4. <b>（思政）</b> 通过文字和图片介绍我国数控技术发展情况，包括我国数控技术方面的现有先进技术，及未来战略发展规划等内容。	1.思考并回答老师的问题 1； 2.通过教师的进一步讲解，熟悉数控技术在工业中的应用情况及学习的重要性。	1.通过课前微视频的学习，及本课程的导学，由学生熟悉的现象导入，创设问题情景，激发学生的探究欲望，发动学生主动地参与学习过程。 2.引出本章内容学习重要性的讲解，以激发学生兴趣，为后续学习打下基础。 3. <b>（思政）</b> 厚植学生爱国精神与创新精神，增强民族自信。
	<b>学 1</b> （20分钟）		1.讲解数字控制技术和数控机床的定义； 2.讲解数字控制技术发展概况； 3.讲解数控系统组成。	1.学习数字控制技术和数控机床的定义； 2.学习数字控制技术发展概况； 3.学习数控系统组成。	在了解了数字控制技术的应用背景后，通过课堂讲授法，使学生对数控技术进行进一步了解和掌握。

			<p>1.简单归纳 3.1.1 内容;</p> <p>2.提问 1: 数字控制技术的应用及应用情况?</p> <p>3.提问 2: 数字控制技术, 单片机控制技术, PLC 控制技术他们之前的关系?</p> <p>4.教师根据学生回答情况进行点评和总结。</p> <p>5.发布拓展材料, 并进行简单说明, 要求学生课后进行阅读。</p>	<p>1.思考并回答老师的问题 1;</p> <p>2.思考并回答老师的问题 2。</p>	<p>1.提问 1 锻炼学生对知识的归纳总结能力</p> <p>2.提问 2 考场学生对所学知识的灵活运用能力。</p> <p>3.拓展材料的引出, 目标是通过学生阅读, 掌握有关基础知识, 为继续学习打下基础。</p>	
			<p>练 1 (15 分钟)</p>			
			<p>3.1.2 数字控制原理 理解数字控制原理</p>			
			<p>1.播放机械零件加工过程。</p> <p>2.提问: 机械零件由数控机床加工而来, 那么加工过程中, 猜想刀具是如何进行行进的?</p> <p>3.根据学生回答情况进行点评并总结, 引出逐点比较插补法数字控制原理</p>	<p>1.学生观看视频, 思考并回答老师问题;</p> <p>2.通过老师基于同学们的回答进行点评,</p>	<p>收看视频, 并回答问题, 开拓思维, 培养学生观察能力, 及思考分析问题能力。</p>	
			<p>讲授数字控制原理, 主要是通过图示方式进行讲解。</p>	<p>学习数字控制原理</p>	<p>基于图片的讲解, 培养学生观察问题, 思考分析问题的能力。</p>	
			<p>思 2 (5 分钟)</p>			
			<p>学 2 (10 分钟)</p>			
<p>课间 5 分钟</p>						

<p><b>学 3</b> (5 分钟)</p>	<p>3.1.3 数字控制方式 了解数字控制三种方式：点位、直线和轮廓。</p>	<p>讲授数字控制三种方式：点位、直线和轮廓。</p>	<p>学习数字控制三种方式：点位、直线和轮廓</p>	<p>此部分内容较为简单，因此利用简单讲解法即可完成此部分教学目标。</p>
<p><b>思 4</b> (5 分钟)</p>	<p>3.1.4 数字控制系统 掌握数字控制系统 3 种类型：开环系统、闭环系统和半闭环系统。</p>	<p>1.提问：开环系统的特点是什么？ 2.提问：闭环系统的特点是什么？</p>	<p>1.思考并回答老师问题 1； 2.思考并回答老师问题 2。</p>	<p>通过提问引发学生思考，对新内容的讲授起到了一定的铺垫作用。</p>
<p><b>学 4</b> (10 分钟)</p>		<p>讲授数字控制系统 3 种类型：开环系统、闭环系统和半闭环系统，重点说明每种系统的特点。</p>	<p>学习数字控制系统 3 种类型：开环系统、闭环系统和半闭环系统，掌握每种系统的特点。</p>	
<p><b>学 5</b> (5 分钟)</p>	<p>3.1.5 数控系统分类 了解数控系统的分类</p>	<p>讲授数控系统的分类：传统数控系统、开放式数控系统和网络化数控系统，重点说明每种系统的特征。</p>	<p>了解数控系统的分类及每种系统的特征。</p>	<p>此部分内容较为简单，因此利用简单讲解法即可完成此部分教学目标。</p>
<p><b>总结及检验</b> (5 分钟)</p>	<p>1.熟悉数字控制技术发展过程及应用背景； 2.清晰掌握数字控制原理和控制方式； 3.了解 3 种数字控制系统和 3 种数控系统分类。</p>	<p>1.数字控制技术的应用，定义及发展； 2.提问 1：数字控制系统组成； 3.提问 2：数字控制原理； 4.提问 3：数字控制系统 3 种类型？ 5.提问：数控系统分类 3 种类</p>	<p>1.学生思考并逐一回答老师问题。</p>	<p>通过教师的不断引导，激发学生对本节课所学内容的再次思考，形成系统知识，有利于学生养成良好的思维品质</p>

			型?		
课后	<p>1.教师基于线上平台布置本节作业，学生定期完成本节测试；</p> <p>2.学生完成本章线上平台思政内容的学习；</p> <p>3.学生阅读线上平台 3.1 节拓展材料的阅读，以加深本节课程所学知识的理解；</p> <p>4.教师基于线上平台和微信进行答疑；</p> <p>5.教师布置下次课预习任务。</p>				
<b>板书</b>					
<p>3.1 数字控制基础</p> <p>1.定义及应用：数字控制、数控机床</p> <p>2.发展、组成、原理、方式、系统、分类</p>					
<b>拓展阅读</b>					
<p>1.数字控制百度百科讲解  <a href="https://baike.baidu.com/item/%E6%95%B0%E5%AD%97%E6%8E%A7%E5%88%B6/3289782?fr=aladdin">https://baike.baidu.com/item/%E6%95%B0%E5%AD%97%E6%8E%A7%E5%88%B6/3289782?fr=aladdin</a></p> <p>2.数控机床百度百科讲解  <a href="https://baike.baidu.com/item/%E6%95%B0%E6%8E%A7%E6%9C%BA%E5%BA%8A/6197?fromModule=lemma_search-box">https://baike.baidu.com/item/%E6%95%B0%E6%8E%A7%E6%9C%BA%E5%BA%8A/6197?fromModule=lemma_search-box</a></p> <p>3.数控系统  <a href="https://baike.baidu.com/item/%E6%95%B0%E6%8E%A7%E7%B3%BB%E7%BB%9F/8114507?fromModule=lemma_search-box">https://baike.baidu.com/item/%E6%95%B0%E6%8E%A7%E7%B3%BB%E7%BB%9F/8114507?fromModule=lemma_search-box</a></p> <p>4.邹晔.典型数控系统及应用.高等教育出版社,2009年.</p>					
<b>教学反思</b>					
<p>1.这一章内容与课程先修课程没有知识关联，因此本次课程在章节导入时候，多利用实例进行讲解，然后将主要关键词介绍清楚后，在往下进行授课，此种方法得到了良好的教学效果。</p> <p>2.不足之处是本节课程的第2学时，数字控制原理较难，需要通过辅助信息化教学手段来进行仿真模拟。下次课程采用动画或微视频法进行讲解。</p>					

本节具体教学内容如下：

### 3.1 数字控制基础

#### 3.1.1 数字控制技术介绍

##### 1.数字控制

数字控制(Numerical Control, NC)是近代发展起来的一种自动控制技术，利用数字化信

号对机床运动及其加工过程进行自动控制,如铣床、车床、加工中心,线切割机以及焊接、气剂机等自动控制系统中。装有数字程序控制系统的机床叫作数控机床,数控机床具有能加工形状复杂的零件、加工精度高、生产效率高、便于改变加工零件品种等许多特点,它是实现机床自动化的一个重要发展方向。数控技术和数控机床是实现柔性制造(Flexible Manufacturing, FM)和计算机集造(Computer Integrated Manufacturing, CIM)的基础技术之一。

所谓数字控制,就是生产机械(如各种加工机床)根据数计算机输出的数字信号按规定的工作顺序、运动轨迹、运动距离和运动速度等流律自动地完成工作的控制方式。

## 2. 数控技术发展概况

世界上第一台数控机床是1952年美国麻省理工学院(MIT)伺服机构实验室开发出来的,当时的主要动机是为了满足高精度和高效率加工复杂零件的需要。众所周知,三维轮廓零件的加工,甚至二维轮廓零件的加工都是很困难的,而数控机床能很容易地实现二维和三维轮廓零件的加工。早期的数控是以数字电路技术为基础来实现的,随着小型和微型计算机的发展,20世纪70年代初期在数控系统中用计算机代替控制装置,从而诞生了计算机数控(Computer Numerical Control, CNC)。表3-1给出了数控技术的现状和发展趋势。

表 3-1 数控技术的现状与发展趋势

特征阶段	年代	典型应用	工艺方法	数控功能	驱动特点
研究开发	1952~1969	数控车床、铣床钻、铣床	简单工艺	NC	3轴以下步进、液压电动机
推广应用	1970~1985	加工中心、电加工、锻压	多种工艺方法	CNC、刀具自动交换、五轴联动、较好的人机界面	直流伺服电动机
系统化	1985~1989	柔性制造单元(FMU)、柔性制造系统(FMS)	复合设计加工	友好的人机界面	交流伺服电动机
高性能集成化	1990~至今	计算机集成制造系统(CIMS)、无人化工厂	复合设计加工	多过程、多任务调度、模板化和复合化、数字智能化	直线驱动

## 3. 数控系统组成

数控系统一般由数控装置、驱动装置、可编程序控制器和检测装置等。数控装置能接收零件图样加工要求的信息,进行插补运算,实时地向各坐标轴发出速度控制指令。驱动装置能快速响应数控装置发出的指令信号,驱动机床各坐标轴运动,同时能提供足够的功率和扭矩。调节控制是数控装置发出运动的指令信号,驱动装置快速响应跟踪指令信号。检测装置将坐标的实际值检测出来,反馈给数控装置的调节电路中的比较器,有差值就发出运动控制信号,从而实现偏差控制。数控装置包括输入装置、输出装置、控制器和插补器4部分,这些功能都由计算机来完成。

### 3.1.2 数字控制原理

首先分析图3-1所示的平面图形如何用计算机在绘图仪或数控加工机床上重现,以此来简要说明数字控制的基本原理。

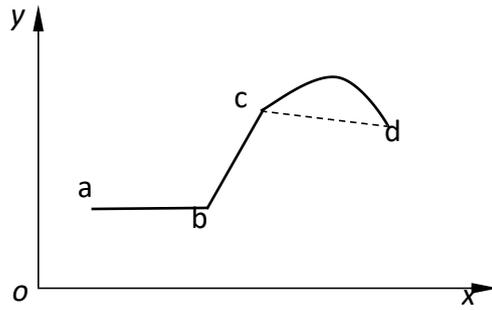


图 3-1 曲线分段

1) 将图 3-所示的曲线分割成若干段,可以是直线段,也可以是曲线段,图中分割成了三段,即 $\overline{ab}$ 、 $\overline{bc}$ 和 $\widehat{cd}$ ,然后把 a、b、c、d 四点坐标记录下来并送给计算机。图形分割的原则应保证线段所连的曲线(或折线)与原图形的误差在允许范围之内。由图可见,显然采用 $\overline{ab}$ 、 $\overline{bc}$ 和 $\widehat{cd}$ 比 $\overline{ab}$ 、 $\overline{bc}$ 和 $\overline{cd}$ 要精确得多。

2) 当给定 a、b、c、d 各点坐标 x 和 y 值之后,需要确定各坐标值之间的中间值,求得这些中间值的数值计算方法称为插值或插补。插补计算的宗旨是通过给定的基点坐标,以一定的速度连续定出一系列中间点,而这些中间点的坐标值是以一定的精度逼近给定的线段。从理论上讲,插补可用任意函数形式,但为了简化插补运算过程和加快插补速度,常用的是直线插补和二次曲线插补两种形式。所谓直线插补是指在给定的两个基点之间用一条近似直线来逼近,也就是由此定出中间点连接起来的折线近似于一条直线,并不是真正的直线。所谓二次曲线插补是指在给定的两个基点之间用一条近似曲线来逼近,也就是实际的中间点连线是条近似于曲线的折线弧。常用的二次曲线有圆弧、抛物线和双曲线等。对图 3-1 所示的曲线来说,显然 ab 和 bc 段用直线插补, cd 段用圆弧插补是合理的。

3) 把插补运算过程中定出的各中间点,以脉冲信号形式去控制 x、y 方向上的步进电机,带动绘图笔、刀具等,从而绘出图形或加工出所要求的轮廓来。这里的每一个脉冲信号代表步进电动机走一步,即绘图笔或刀具在 x 或 y 方向移动一个位置。对应于每个脉冲移动的相对位置称为脉冲当量,又称为步长,常用 $\Delta x$ 和 $\Delta y$ 来表示,并且总是取 $\Delta x = \Delta y$ 。

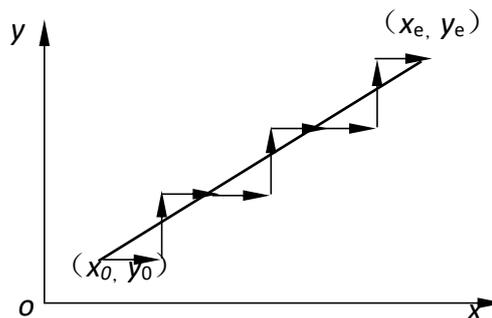


图 3-2 用折线逼近直线段

图 3-2 是一段用折线逼近直线的直线插补线段,其中 $(x_0, y_0)$ 代表该线段的起点坐标值, $(x_e, y_e)$ 代表终点坐标值,则 x 方向和 y 方向应移动的总步数 $N_x$ 和 $N_y$ ,分别为

$$N_x = (x_e - x_0) / \Delta x, \quad N_y = (y_e - y_0) / \Delta y$$

如果把 $\Delta x$ 和 $\Delta y$ 定义为坐标增量值,即 x、y、 $x_0$ 、 $y_0$ 均是以脉冲当量定义的坐标值,则

$$N_x = x_e - x_0, \quad N_y = y_e - y_0$$

所以,插补运算就是如何分配  $x$  和  $y$  方向上的脉冲数,使实际的中间点轨迹尽可能地逼近理想轨迹。实际的中间点连接线是一条由  $\Delta x$  和  $\Delta y$  的增量值组成的折线,只是由于实际的  $\Delta x$  和  $\Delta y$  的值很小,眼睛分辨不出来,看起来似乎和直线一样而已。显然  $\Delta x$  和  $\Delta y$  的增量值越小,就越逼近理想的直线段,图中均以代表  $\Delta x$  或  $\Delta y$  的长度和方向。

### 3.1.3 数字控制方式

数控系统按控制方式来分类,可以分为点位控制、直线切削控制和轮廓切削控制,这 3 种控制方式都是运动的轨迹控制。

#### 1. 点位控制

特点是在一个点位控制系统中,只要求控制刀具行程终点的坐标值,即工件加工点准确定位至于刀具从一个加工点移到下一个加工点走什么路径、移动的速度、沿哪个方向趋近都无需规定,并且在移动过程中不做任何加工,只是在准确到达指定位置后才开始加工。在机床加工业中,采用这类控制的主要是孔加工机床,如钻床、镗床、冲床等。

#### 2. 直线控制

特点是控制行程的终点坐标值,不过还要求刀具相对于工件平行某一直角坐标轴做直线运动,且在运动过程中进行切削加工。需要这类控制的有铣床、车床、磨床、加工中心等。

#### 3. 轮廓控制

特点是能够控制刀具沿工件轮廓曲线不断地运动,并在运动过程中将工件加工成某一形状。这种方式是借助于插补器进行的,插补器根据加工的工件轮廓向每一坐标轴分配速度指令,以获得图样坐标点之间的中间点。这类控制用于铣床、车床、磨床、齿轮加工机床等。

在上述 3 种控制方式中以点位控制最简单,因为它的运动轨迹没有特殊要求,运动时又不加工,所以它的控制电路只要具有记忆(记下刀具应走的移动量和已走过的移动量)和比较(将所记忆的两个移动量进行比较,当两个数值的差为零时,刀具立即停止)的功能即可,根本不需要插补计算。和点位控制相比,由于直线切削控制进行直线加工,其控制电路要复杂轮廓切削控制要控制刀具准确地完成复杂的曲线运动,所以控制电路复杂,且需要进行一系列的插补计算和判断。

### 3.1.4 数字控制系统

计算机数控系统主要分为开环数字控制和闭环数字控制两大类,由于它们的控制原理不同,因此其系统结构差异很大。

#### 1. 开环数字控制

随着计算机技术的发展,开环数字控制得到了广泛的应用,例如各类数控机床、线切割机、低速小型数字绘图仪等,它们都是利用开环数字控制原理实现控制的机械加工或绘图设备。开环数字控制的结构如图 3-3 所示,这种控制结构没有反馈检测元件,工作台由步进电动机驱动。步进电动机接收步进电动机驱动电路发来的指令脉冲作相应的旋转,把刀具移动到与指令脉冲相当的位置,至于刀具是否到达了指令脉冲规定的位置,那是不受任何检查的。因此这种控制的可靠性和精度基本上由步进电动机和传动装置来决定。

开环数字控制结构简单,因此可靠性高、成本低、易于调整和维护等,国内经济型数控系统应用最为广泛。由于采用了步进电动机作为驱动元件,使得系统的可控性变得更加灵活,更易于实现各种插补运算和运动轨迹控制。本章主要是讨论开环数字控制技术。



图 3-3 开环数字控制

## 2. 闭环数字控制

图 3-4a 给出了一种闭环数字控制的结构图。这种结构的执行机构多采用直流电动机(小惯量伺服电动机和宽调速力矩电动机)作为驱动元件,反馈测量元件采用光电编码器(码盘)、光栅、感应同步器等,该控制方式主要用于大型精密加工机床,但其结构复杂,难于调整和维护,一些常规的数控系统很少采用。

将测量元件从工作台移动到伺服电动机的轴端,这就构成了半闭环控制系统,如图 3-4b 所示。这样构成的系统,工作台不在控制环内,克服了由于工作台的某些机械环节的特性引起的参数变动,容易获得稳定的控制特性,广泛应用于连续控制的数控机床上。

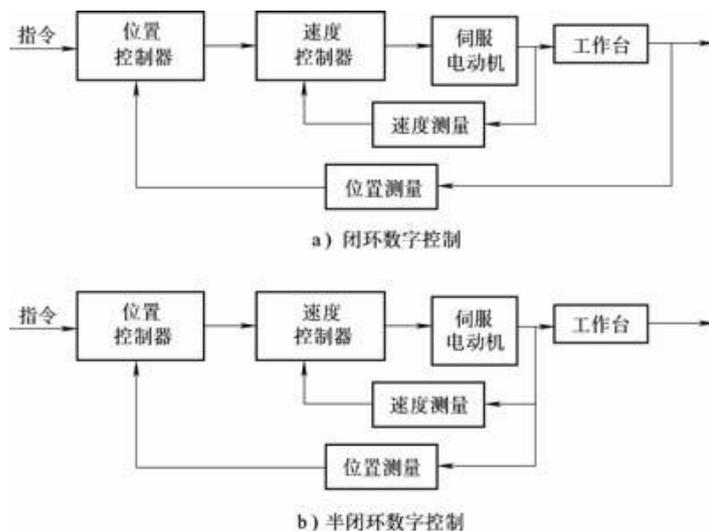


图 3-4 闭环数字控制和半闭环数字控制

### 3.1.5 数控系统的分类

#### 1. 传统数控系统

传统数控系统,又称为硬件式数控,零件程序的输入、运算、插补及控制功能均由专用硬件来完成,这是一种专用的封闭体系结构,其功能简单、柔性通用性差、设计研发周期长。

#### 2. 开放式数控系统

(1) PC IN NC 结构式数控系统。这是一类基于传统数控系统的半开放式数控系统,这一类数控系统是在不改变原系统基本结构的基础上,借助了 PC 丰富的软硬件资源和多媒体部件,把 PC 和 NC 联系在一起,它既具有原数控系统工作可靠的特点,同时它的界面又比原来的数控系统开放,大大提高了人机界面的功能,使数控系统的功能得以完美体现,而且使用更加方便。

(2) NC IN PC 结构式数控系统。这种数控系统由 PC 和开放式的运动控制卡构成。所谓的开放式运动控制卡,就是一个可以单独使用的数控系统,具有很强的运动控制和 PLC 控制能力,它还具有开放的函数库供用户进行自主开发,以构造自己所需要的数控系统。这类数控系统具有可靠性高、功能强、性能好、操作简单方便、开发周期短、成本低等优点,而且适合各种类型数控系统的开发,因此被广泛应用于制造业自动化控制各个领域。

#### 3. 网络化数控系统

网络化数控装备是近两年数控技术发展的一个新亮点。对于面临日益全球化竞争的现代制造工厂来说,一是要提高数控机床的拥有率,二是所拥有的数控机床必须具有联网通信功能,以保证信息流在车间的底层之间及底层与上层之间的通信。数控系统生产厂商已在几年前推出了具有网络功能的数控系统。在这些系统中,除了传统的 RS232 接口外,还备有以太网接口,为数控机床联网提基本条件。目前数控的网络化主要采用以太网以及现场总线的方式,随着无线技术的发展,数控系统网络在不久的将来可能会无处不在。

## 授课章节 3.2 运动轨迹插补—3.2.1 逐点比较法直线插补

授课学时	2 学时	授课类型	理论课
教学目的及要求	1.掌握四象限逐点比较法直线插补原理；（知识目标） 2.能根据插补目标点，进行插补计算；（能力目标） 3.分析直线插补程序流程；（能力目标） 4.通过插补计算，培养学生锲而不舍，一丝不苟的工匠精神。（素养目标）		
教学重点与难点	教学重点：直线逐点比较法插补技术第一象限实现方法		
	教学难点：直线逐点比较法插补技术第二三四象限实现方法		
教学方法	1.理论讲授与多媒体演示相结合 2.微课视频法 3.启发式教学方法		
教学手段	1.多媒体教学 2.板书 3.信息化教学：线上教学平台（课前观看微视频、课堂提问、课堂签到、课后测评及学习等）。 4.机械零件		

## 教学实施过程

教学环节	教学内容	教师活动	学生活动	设计意图
课前： 线上	1.了解本节逐点比较法直线插补的具体学习内容和学习目标等； 2.了解直线插补基本过程；	1.线上平台发布本节学习内容、学习目标及学习重难点内容； 2.线上平台发布插补原理微视频。	1.学生在线上平台了解本节学习内容、学习目标及学习重难点内容； 2.学生在线上平台收看插补原理微视频，尝试理解第一象限直线插补过程。	让学生提前对本课程内容进行了解，有助于本课程内容的顺利开展。

课 中 : 线 下	思 1 课程导入 (10 分钟)	<p>1.第一象限内的直线插补 (教学重点)</p> <p>(1)插补过程推导</p> <p>(2)插补过程总结</p> <p>(3)练习题</p>	<p>1.提问 1:什么是数字控制技术,其应用领域有哪些,请举例;</p> <p>2.提问 1:复习回顾上节课数字控制技术介绍中,插补原理的含义是什么;通过学生的回答,教师总结插补原理;</p> <p>3.提问 3:设想做一个方形铁块,应该怎样加工。</p>	<p>1.思考并回答老师问题 1;</p> <p>2.思考并回答老师问题 2;并通过教师的进一步讲解,掌握插补原理;</p> <p>3.思考并回答老师问题 3。</p>	<p>1.通过复习提问 1 和 2,检验学生上节课内容学习情况,为本节课学习打下基础;</p> <p>2.通过提问 3,由学生熟悉的现象导入,创设问题情景,激发学生的探究欲望,引发本节课直线插补的学习兴趣。</p>
	学 1 (20 分钟)	<p>1.基于推导法,讲解逐点比较法第一象限直线插补过程;</p> <p>在推导过程中与学生进行积极互动。</p> <p>互动 1:插补过程点在直线上,直线上方,直线下方,这三种位置,其斜率与最终插补点斜率关系?</p> <p>互动 2:插补过程点在直线上,直线上方,直线下方,这三种位置时,下一步进给方向?</p> <p>2.总结插补过程</p>	<p>通过教师讲解,学习逐点比较法第一象限直线插补方法。</p> <p>互动 1:完成与教师互动</p> <p>互动 2:完成与教师互动</p>	<p>在推导过程中,与学生进行积极互动,发动学生主动地参与学习过程。</p>	

	<p><b>练 1</b> (15 分钟)</p>		<p>1.【练习题】设加工第一象限直线 OE，起点为(0, 0)，终点坐标为(6, 3)试进行插补计算，并作出走步轨迹图。</p> <p>2.根据学生完成情况教师进行点评与总结。</p>	<p>学生根据本课程讲解的第一象限直线插补过程完成此例题，要求学生在笔记本上完成逐步推导。</p>	<p>1.通过完成练习题，加深巩固所学知识。</p> <p>2. <b>(思政)</b> 通过插补过程的逐步计算，培养学生锲而不舍，一丝不苟的工匠精神。</p>
<p>间歇 5 分钟</p>					
	<p><b>思 2</b> (8 分钟)</p>	<p>2.4 个象限直线插补 (教学难点)</p>	<p>1.提问 1:当插补点在第 2,3,4 象限时，斜率关系？然后教师根据学生回答情况进行总结；</p> <p>2.提问 2:当插补点在第 2,3,4 象限时，进给方向？然后教师根据学生回答情况进行总结。</p>	<p>1.学生观看屏幕图片，思考并回答老师问题 1；</p> <p>2.学生观看屏幕图片，思考并回答老师问题 2；</p>	<p>1.基于图片的讲解，培养学生观察，思考及分析能力；</p> <p>2.通过提问方式进行思考学习，使学生亲身参与探究过程，有利于学生知识的建构。</p>
	<p><b>学 2</b> (7 分钟)</p>		<p>基于第 1 象限插补过程，以此类推，将 4 个象限直线插补进行总体说明</p>	<p>学习 4 个象限直线插补过程。</p>	
	<p><b>练 2</b> (10 分钟)</p>		<p>1.【练习题】设加工第二象限直线 OE，起点为(0, 0)，终点坐</p>	<p>学生根据本课程讲解的第二象限直线插补过程完成此例题，要求</p>	<p>1.通过完成练习题，加深巩固所学知识。</p> <p>2. <b>(思政)</b> 通过</p>

		<p>标为(-6, 3)试进行插补计算,并作出走步轨迹图。</p> <p>2.根据学生完成情况教师进行点评与总结。</p>	学生在笔记本上完成逐步推导。	插补过程的逐步计算,培养学生锲而不舍,一丝不苟的工匠精神。
<b>思 3</b> (8分钟)	3.逐点比较法的直线插补程序流程	<p>讨论 1: 对照 4 个象限直线插补说明,讨论程序完成第一象限插补流程;</p> <p>教师根据学生回答的情况进行点评,由此总结第 1 象限插补流程。</p>	小组讨论老师提出的问题,并派代表回答问题。	通过讨论使学生深入思考,并用联想的方法将模拟实验迁移到本课知识学习中。
<b>学 3</b> (7分钟)		基于第 1 象限插补流程,补充说明其他象限插补流程	通过对比分析,掌握其他象限插补流程。	通过联系对比,给学生系统和相对完整的知识体系,并流程图形式进行总结。
<b>总结及检验</b> (5分钟)	总结本节课程内容	<p>1.采用互动式总结方式;</p> <p>2.强调说明本节课学习重难点及教学目标;</p> <p>3.布置本节课作业。</p>	<p>1.学生跟随教师总结过程进行温习回顾;</p> <p>2.完成本节课作业。</p>	<p>1.通过教师的不断引导式总结,激发学生对本节课所学内容的再次思考,有利于形成系统知识;</p> <p>2.通过再次强调说明方式,加深学对关键内容的掌握。</p>
<b>课后:</b> <b>线</b>	<p>1.教师基于线上平台布置本节作业,学生定期完成本节测试;</p> <p>2.学生完成本章线上平台思政内容的学习;</p> <p>3.学生阅读线上平台 3.2 节拓展材料的阅读,以加深本节课程所学知识的理解;</p> <p>4.教师基于线上平台和微信进行答疑;</p>			

上 5.教师布置下次课预习任务。

## 板书

### 3.2.1 逐点比较法的直线插补（第 1 课时）

#### 1. 第一象限内

偏差判别、坐标进给、偏差计算、终点判断

#### 2. 例题

#### 3. 二、三、四象限，插补步骤（第 2 课时）

步骤、练习题（注意符号问题）

#### 4. 直线插补的实现：编程思路

## 拓展阅读

[1]朱宁.逐点比较直线插补算法的研究[J].装备维修技术,2019(03):8-10.

[2]朱志坤,王细洋,刘隰双,田智.直线插补在回转类零件周向槽铣削中的应用[J].航空制造技术,2015(Z1):101-104.

[3]王为达,樊瑜瑾,韩腾,槐建明.逐点比较法直线插补算法的研究[J].机电一体化,2013,19(09):53-55+64.

[4]汪摇红,蒙摇斌.数控机床逐点比较法直线插补的优化与应用[J].兰州石化职业技术学院学报,2011,11(02):11-13.

[5]廖述常.基于 PIC 单片机的多轴直线插补的 C 程序设计[J].机电工程技术,2010,39(06):42-44+160+166.

## 教学反思

1.本节课重点讲授逐点比较法直线插补方法，通过课堂教学，发现在进行方法推到过程中，采用传统的 PPT 演示法没有起到很好的教学效果，忽略了推导过程的重要性，因此下次课程，本部分推导内容利用板书完成。

2.本节课程先将第一象限的插补过程进行详细讲解，其他象限通过推理得到，并给出了注意事项。通过 2 学时完成了四个象限的插补方法，教学效率和教学效果较好。

## 本节具体教学内容如下：

### 3.2.1 逐点比较法直线插补

常用的脉冲增量插补方法是逐点比较法。所谓逐点比较法插补,就是刀具或绘图笔每走步都要和给定轨迹上的坐标值进行比较,看这点在给定轨迹的上方或下方,或是给定轨迹的里面或外面,从而决定下一步的进给方向。如果原来在给定轨迹的下方,下一步就向给定轨迹的上方走,如果原来在给定轨迹的里面,下一步就向给定轨迹的外面走…如此,走一步、看一看,比较一次,决定下一步走向,以便逼近给定轨迹,即形成逐点比较插补逐点比较法是以阶梯折线来逼近直线或圆弧等曲线的,它与规定的加工直线或圆弧之间的最大误差为一个脉冲当量,因此只要把脉冲当量(每走一步的距离即步长)取得足够小就可达到加工精度的要求。下面分

别介绍逐点比较法直线插补和圆弧插补以及数字积分的插补算法原理。

### 1. 第一象限内的直线插补

#### (1) 偏差计算公式

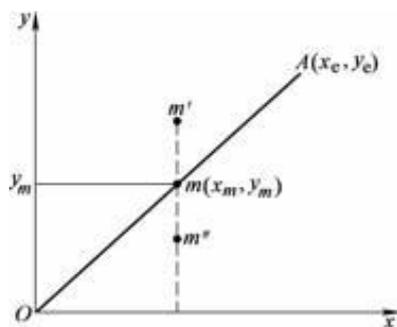


图 3-5 第一象限直线

根据逐点比较法插补原理,必须把每一插值点(动点)的实际位置与给定轨迹的理想位置间的误差,即“偏差”计算出来,根据偏差的正、负决定下一步的走向,来逼近给定轨迹。因此偏差计算是逐点比较法关键的一步。

在第一象限想加工出直线段  $OA$ ,取直线段的起点为坐标原点,直线段终点坐标  $(x_e, y_e)$  是已知的,如图 3-5 所示。点  $m(x_m, y_m)$  为加工点(动点),若点  $m$  在直线段  $OA$  上,则有

$$x_m/y_m = x_e/y_e$$

即

$$x_m/y_m - x_e/y_e = 0$$

现定义直线插补的偏差判别式为

$$F_m = y_m x_e - x_m y_e \quad (3-1)$$

若  $F_m=0$ ,表明点  $m$  在  $OA$  直线段上;若  $F_m>0$ ,表明点  $m$  在  $OA$  直线段的上方,即点  $m'$  处;若  $F_m<0$ ,表明点  $m$  在  $OA$  直线段的下方,即点  $m''$  处。

由此可得第一象限直线逐点比较法插补的原理是:从直线的起点(即坐标原点)出发,当  $F_m \geq 0$  时,沿  $+x$  轴方向走一步;当  $F_m < 0$  时,沿  $+y$  方向走一步;当两方向所走的步数与终点坐标  $(x_e, y_e)$  相等时,发出终点到信号,停止插补。

按式(3-1)计算偏差,要做两次乘法,一次减法,比较麻烦,因此需要进一步简化。下面推导简化的偏差计算公式。

1) 设加工点正处于  $m$  点,当  $F_m \geq 0$  时,表明  $m$  点在  $OA$  上或  $OA$  上方,应沿  $+x$  方向进给一步至  $(m+1)$  点,该点的坐标值为

$$F_{m+1} = y_{m+1} x_e - x_{m+1} y_e = y_m x_e - (x_m + 1) y_e = F_m - y_e \quad (3-1)$$

2) 设加工点正处于  $m$  点,当  $F_m < 0$  时,表明  $m$  点在  $OA$  下方,应向  $+y$  方向进给一步至  $(m+1)$  点,该点的坐标值为

$$x_{m+1} = x_m$$

$$y_{m+1} = y_m + 1$$

该点的偏差为

$$F_{m+1} = y_{m+1} x_e - x_{m+1} y_e = (y_m + 1) x_e - x_m y_e = F_m + x_e \quad (3-3)$$

式(3-2)和式(3-3)是简化后偏差计算公式,在公式中只有一次加法或减法运算,新的加工点的偏差  $F_{m+1}$  都可以由前一点偏差  $F_m$  和终点坐标相加或相减得到。特别要注意,加工的起点是坐标

原点,起点的偏差是已知的,即  $F_0=0$ 。

### (2) 终点判断方法

逐点比较法的终点判断有多种方法,下面介绍两种方法:

1) 设置  $N_x$  和  $N_y$  两个减法计数器,在加工开始前,在  $N_x$  和  $N_y$  计数器中分别存入终点坐标值  $x_e$  和  $y_e$ ,在  $x$  坐标(或  $y$  坐标)进给一步时,就在  $N_x$  计数器(或  $N_y$  计数器)中减去 1,直到这两个计数器中的数都减到零时,到达终点。

2) 用一个终点计数器,寄存  $x$  和  $y$  两个坐标进给的总步数  $N_{xy}$ , $x$  或  $y$  坐标进给一步,  $N_{xy}$  就减 1,若  $N_{xy}=0$ , 则就到达终点。

### 3) 插补计算过程

插补计算时,每走一步,都要进行以下 4 个步骤的插补计算过程,即偏差判别、坐标进给、偏差计算、终点判断。

**练习题** 设加工第一象限直线  $OA$ ,起点为  $O(0,0)$ ,终点坐标为  $A(6,4)$ ,试进行插补计算并作出走步轨迹图。

**解** 坐标进给的总步数  $N_{xy} = |6-0| + |4-0| = 10$ ,  $x_e = 6$ ,  $y_e = 4$ ,  $F_0 = 0$ ,  $xOy = 1$ 。插补计算过程见表 3-3。

表 3-3 插补计算过程

步 数	偏差判别	坐标进给	偏差计算	终点判断
起点			$F_0=0$	$N_{xy}=10$
1	$F_0=0$	+x	$F_1=F_0-y_e=-4$	$N_{xy}=9$
2	$F_1<0$	+y	$F_2=F_1+x_e=2$	$N_{xy}=8$
3	$F_2>0$	+x	$F_3=F_2-y_e=-2$	$N_{xy}=7$
4	$F_3<0$	+y	$F_4=F_3+x_e=4$	$N_{xy}=6$
5	$F_4>0$	+x	$F_5=F_4-y_e=0$	$N_{xy}=5$
6	$F_5=0$	+y	$F_6=F_5-y_e=-4$	$N_{xy}=4$
7	$F_6<0$	+y	$F_7=F_6+x_e=2$	$N_{xy}=3$
8	$F_7>0$	+x	$F_8=F_7-y_e=-2$	$N_{xy}=2$
9	$F_8<0$	+y	$F_9=F_8+x_e=4$	$N_{xy}=1$
10	$F_9>0$	+x	$F_{10}=F_9-y_e=0$	$N_{xy}=0$

直线插补的走步轨迹图如图 3-6 所示。

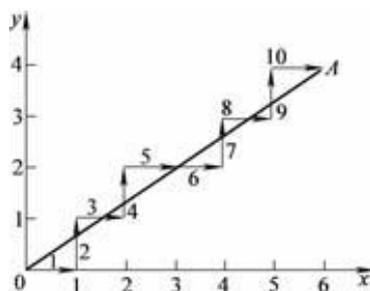


图 3-6 直线插补走步轨迹图

## 2. 四个象限的直线插补

不同象限直线插补的偏差符号及坐标进给方向如图 3-7 所示。

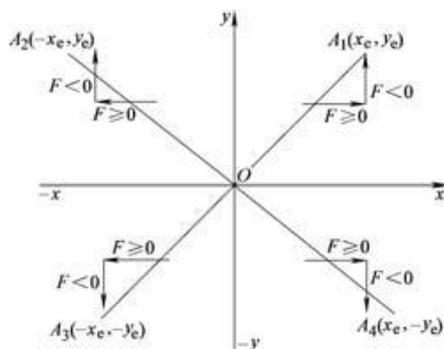


图 3-7 偏差符号与进给方向的关系

由图 3-6 可以推导得出,4 个象限直线插补的偏差计算公式和坐标进给方向,详见表 3-2。该表中 4 个象限的终点坐标值取绝对值代入计算式中的  $x_e$  和  $y_e$ 。

表 3-2 直线插补的进给方向及偏差计算公式

$F_m \geq 0$			$F_m < 0$		
所在象限	进给方向	偏差计算	所在象限	进给方向	偏差计算
一、四	+x	$F_{m+1} = F_m - y_e$	一、二	+y	$F_{m+1} = F_m + x_e$
二、三	-x		三、四	-y	

### 3. 直线插补计算的程序实现

#### (1) 数据的输入及存放

在计算机的内存中开辟 6 个单元 XE、YE、NXY、FM、XOY 和 ZF,分别存放终点横坐标  $x_e$ 、终点纵坐标  $y_e$ 、总步数  $N_{xy}$ 、加工点偏差  $F_m$ 、直线所在象限值  $xOy$  和走步方向标志。这里  $N_{xy}=N_x+N_y$ , $xOy$  等于 1、2、3、4 分别代表第一、第二、第三、第四象限, $xOy$  的值可由终点坐标  $(x_e, y_e)$  的正、负符号来确定, $F_m$  的初值为  $F_0=0$ ,ZF=1、2、3、4 分别代表 +x、-x、+y、-y 走步方向。

#### (2) 直线插补计算的程序流程

图 3-8 为直线插补计算的程序流程图,该图按照插补计算过程的 4 个步骤即偏差判别、坐标进给、偏差计算、终点判断来实现插补计算程序。偏差判别、偏差计算、终点判断是逻辑运算和算术运算,容易编写程序,而坐标进给通常是给步进电动机发走步脉冲,通过步进电动机带动机床工作台或刀具移动。

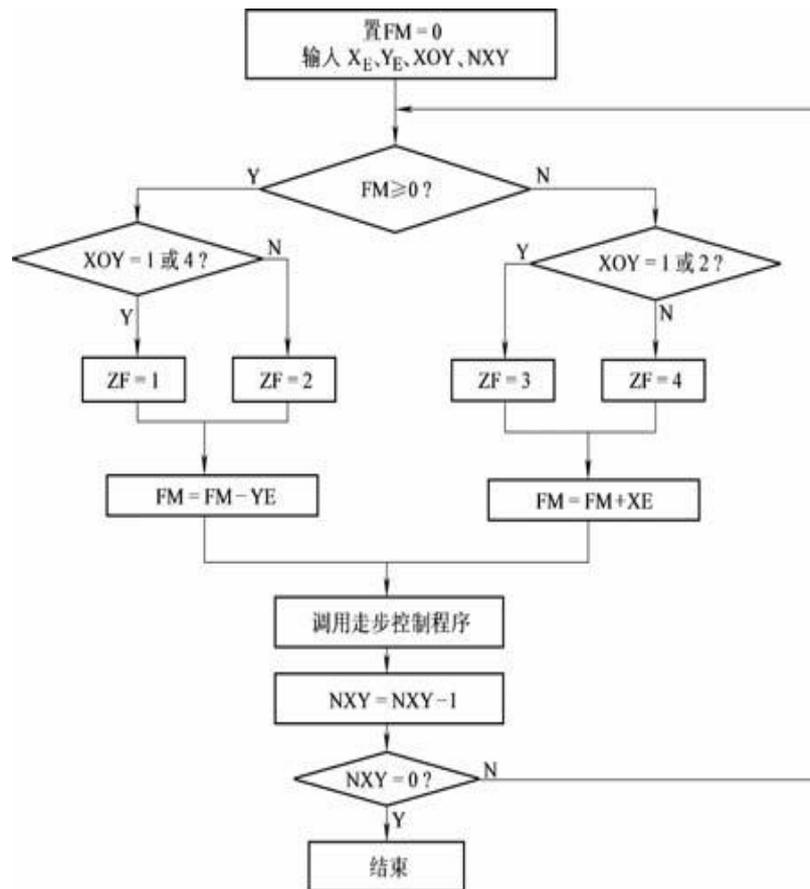


图 3-8 直线插补程序进给图

## 授课章节 3.2 运动轨迹插补—3.2.2 逐点比较法圆弧插补

授课学时	2 学时	授课类型	理论课
教学目的及要求	1.掌握四象限逐点比较法圆弧插补原理；（知识目标） 2.能根据插补目标点，进行插补计算；（能力目标） 3.分析圆弧插补程序流程；（能力目标） 4.通过插补计算，培养学生锲而不舍，一丝不苟的工匠精神。（素养目标）		
教学重点与难点	教学重点：圆弧逐点比较法插补技术第一象限实现方法		
	教学难点：圆弧逐点比较法插补技术第二三四象限实现方法		
教学方法	1.理论讲授与多媒体演示相结合 2.微课视频法 3.启发式教学方法		
教学手段	1.多媒体教学 2.板书 3.信息化教学：线上教学平台（课前观看微视频、课堂提问、课堂签到、课后测评及学习等）。 4.机械零件		

## 教学实施过程

教学环节	教学内容	教师活动	学生活动	设计意图
课前： 线上	1.了解本节逐点比较法圆弧插补的具体学习内容和学习目标等； 2.了解圆弧插补基本过程；	1.线上平台发布本节学习内容、学习目标及学习重难点内容； 2.线上平台发布圆弧插补原理微视频。	1.学生在线上平台了解本节学习内容、学习目标及学习重难点内容； 2.学生在线上平台收看圆弧插补原理微视频，尝试理解第一象限圆弧插补过程。	让学生提前对本课程内容进行了解，有助于本课程内容的顺利开展。

课 中 ： 线 下	思 1 课程导入（10分钟）	<p>1.第一象限内的圆弧插补（教学重点）</p> <p>（1）插补过程推导</p> <p>（2）插补过程总结</p> <p>（3）练习题</p>	<p>1.提问 1:直线插补过程；4 个象限直线插补相同处和区别在哪里；</p> <p>2.提问 2:观察图片，设想做一个圆形铁块，应该怎样加工。</p>	<p>1.回顾上节课内容，回答老师问题 1；</p> <p>2.观察图片，思考并回答老师问题 2。</p>	<p>1.通过复习提问 1,检验学生上节课内容学习情况，为本节课学习打下基础；</p> <p>2.通过提问 2,由学生熟悉的现象导入，创设问题情景，激发学生的探究欲望，引发本门课程圆弧插补的学习兴趣。</p>
	学 1 （20分钟）		<p>1.基于推导法，讲解逐点比较法第一象限圆弧插补过程；</p> <p>在推导过程中与学生进行积极互动。</p> <p>互动 1：插补过程点在圆弧上，圆弧内，圆弧外，这三种位置，其半径关系？</p> <p>互动 2：插补过程点在圆弧上，圆弧内，圆弧外，这三种位置时，下一步进给方向？</p> <p>2.总结插补过程</p>	<p>通过教师讲解，学习逐点比较法第一象限圆弧插补方法。</p> <p>互动 1：完成与教师互动</p> <p>互动 2：完成与教师互动</p>	<p>在推导过程中，与学生进行积极互动，发动学生主动地参与学习过程。</p>
	练 1 （15分钟）		<p>1.【练习题】设加工第一象限逆圆弧 <math>\overset{\frown}{AB}</math>，已知起点的坐标为</p>	<p>学生根据本课程讲解的第一象限圆弧插补过程完成此例题，要求</p>	<p>1.通过完成练习题，加深巩固所学知识。</p> <p>2.（思政）通过</p>

		<p>A(4,0), 终点的坐标为 B(0,4), 试进行插补计算并作出走步轨迹图。</p> <p>2.根据学生完成情况教师进行点评与总结。</p>	学生在笔记本上完成逐步推导。	插补过程的逐步计算, 培养学生锲而不舍, 一丝不苟的工匠精神。
<p>午休 5 分钟</p>				
<p><b>思 2</b> (8 分钟)</p>	<p>2.4 个象限圆弧插补 (教学难点)</p>	<p>1.提问 1: 当插补点在第 2,3,4 象限时, 与半径关系? 然后教师根据学生回答情况进行总结;</p> <p>2.提问 2: 当插补点在第 2,3,4 象限时, 进给方向? 然后教师根据学生回答情况进行总结。</p>	<p>1.学生观看屏幕图片, 思考并回答老师问题 1;</p> <p>2.学生观看屏幕图片, 思考并回答老师问题 2;</p>	<p>1.基于图片的讲解, 培养学生观察, 思考及分析能力;</p> <p>2.通过提问方式进行思考学习, 使学生亲身参与探究过程, 有利于学生知识的建构。</p>
		<p>基于第 1 象限插补过程, 以此类推, 将 4 个象限圆弧插补进行总体说明</p>	学习 4 个象限圆弧插补过程。	
		<p>1.【练习题】设加工第二象限圆弧 AB, 起点为 (0,5), 终点坐标为 (-5,0) 试进行插补计算, 并作出走步轨迹图。</p>	学生根据本课程讲解的第二象限圆弧插补过程完成此例题, 要求学生在笔记本上完成逐步推导。	<p>1.通过完成练习题, 加深巩固所学知识。</p> <p>2. <b>(思政)</b> 通过插补过程的逐步计算, 培养学生锲而不舍, 一</p>
<p><b>学 2</b> (7 分钟)</p>				
<p><b>练 2</b> (10 分钟)</p>				

			2.根据学生完成情况教师进行点评与总结。		不苟的工匠精神。
	<b>思 3</b> (8分钟)	3.逐点比较法的圆弧插补程序流程	讨论 1: 对照 4 个象限圆弧插补说明, 讨论程序完成第一象限插补流程; 教师根据学生回答的情况进行点评, 由此总结第 1 象限插补流程。	小组讨论老师提出的问题, 并派代表回答问题。	通过讨论使学生深入思考, 并用联想的方法将模拟实验迁移到本课知识学习中。
	<b>学 3</b> (7分钟)		基于第 1 象限插补流程, 补充说明其他象限插补流程	通过对比分析, 掌握其他象限插补流程。	通过联系对比, 给学生系统和相对完整的知识体系, 并流程图形式进行总结。
	<b>总结及检验</b> (5分钟)	总结本节课程内容	1.采用互动式总结方式; 2.强调说明本节课学习重难点及教学目标; 3.布置本节课作业。	1.学生跟随教师总结过程进行温习回顾; 2.完成本节课作业。	1.通过教师的不断引导式总结, 激发学生对本节课所学内容的再次思考, 有利于形成系统知识; 2.通过再次强调说明方式, 加深学对关键内容的掌握。
<b>课后线上</b>	1.教师基于线上平台布置本节作业, 学生定期完成本节测试; 2.学生完成本章线上平台思政内容的学习; 3.学生阅读线上平台 3.2 节拓展材料的阅读, 以加深本节课程所学知识的理解; 4.教师基于线上平台和微信进行答疑; 5.教师布置下次课预习任务。				
<b>板书</b>					
3.2.2 逐点比较法的圆弧插补 (第 1 课时)					

## 1. 第一象限内

偏差判别、坐标进给、偏差计算、坐标计算、终点判断

## 2. 例题

## 3. 二、三、四象限，插补步骤（第2课时）

步骤、练习题（注意符号问题）

## 4. 圆弧插补的实现：编程思路

## 拓展阅读

[1]任聪,姜彤.直线圆弧插补仿真研究[J].中外企业家,2020(14):246.

[2]牛方方.基于圆弧插补的工业码垛机器人轨迹规划[J].机械制造与自动化,2018,47(04):149-151.

[3]李双成,莫玉梅,陈兴媚.数据采样法圆弧插补运算研究[J].机电技术,2017(03):14-17+25.

[4]夏欢.数控机床直线插补与圆弧插补分析[J].科技与创新,2015(06):18+22.

[5]任喜岩,谭晓东,白杰.PLC 圆弧插补功能开发与研究[J].制造业自动化,2009,31(11):83-86.

[6]周慧.数据采样法圆弧插补的新算法[J].组合机床与自动化加工技术,2004(02):40-41+44.

## 教学反思

1. 本节课先讲授第1象限插补方法和程序，然后进行对比学习，讲授其他象限插补方法和程序，通过学生完成练习题情况和课堂互动情况，可得出此对比类型的启发式教学方法效果较好。

2. 学生已经学习了逐点比较法直线插补方法和圆弧插补方法，但是如何将这种方法应用于实践当中还是模糊。下次课程利用工业虚拟软件或视频来进一步演示说明这个方法的目前工程应用情况。

## 本节具体教学内容如下：

## 3.2.2 逐点比较法圆弧插补

## 1. 第一象限内的圆弧插补

## (1) 偏差计算公式

设要加工逆圆弧  $\widehat{AB}$ ，如图 3-9 所示，圆弧的圆心在坐标原点，并已知圆弧的起点为  $A(x_0, y_0)$ ，终点  $B(x_e, y_e)$ ，圆弧半径为  $R$ 。令瞬时加工点为  $m(x_m, y_m)$ ，它与圆心的距离为  $R_m$ ，显然，可以比较  $R_m$  和  $R$  来反映加工偏差。比较  $R_m$  和  $R$ ，实际上是比较它们的二次方值。

由第一象限逆圆弧  $\widehat{AB}$  可知

$$R_m^2 = x_m^2 + y_m^2, \quad R_0^2 = x_0^2 + y_0^2$$

因此，可定义偏差判别式为

$$F_m = R_m^2 - R^2 = x_m^2 + y_m^2 - R^2 \quad (3-4)$$

若  $F_m=0$ ,表明加工点  $m$  在圆弧上; $F_m>0$ ,表明加工点在圆弧外; $F_m<0$ ,表明加工点在圆弧内。

由此可得第一象限逆圆弧逐点比较插补的原理是:从圆弧的起点出发,当  $F_m \geq 0$ ,为了逼近圆弧,

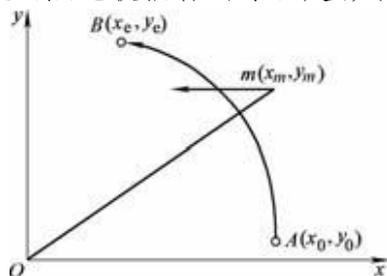


图 3-9 第一象限逆圆弧

下一步向  $-x$  方向进给一步,并计算新的偏差;若  $F_m < 0$ ,为了逼近圆弧,下一步向  $+y$  方向进给一步,并计算新的偏差。如此一步步计算和一步步进给,并在到达终点后停止计算,就可插补出图 3-9 所示的第一象限逆圆弧。

为了简化偏差判别式(3-4)的计算,下面推导出简化的偏差计算的递推公式。

1) 设加工点正处于  $m(x_m, y_m)$  点,当  $F_m \geq 0$  时,应沿  $-x$  方向进给一步至  $(m+1)$  点,其坐标值为

$$\begin{aligned} x_{m+1} &= x_m - 1 \\ y_{m+1} &= y_m \end{aligned} \quad (3-5)$$

新的加工点的偏差为

$$F_{m+1} = x_{m+1}^2 + y_{m+1}^2 - R^2 = (x_m - 1)^2 + y_m^2 - R^2 = F_m - 2x_m + 1 \quad (3-6)$$

2) 设加工点正处于  $m(x_m, y_m)$  点,当  $F_m < 0$  时,应沿  $+y$  方向进给一步至  $(m+1)$  点,其坐标值为

$$\begin{aligned} x_{m+1} &= x_m \\ y_{m+1} &= y_m + 1 \end{aligned} \quad (3-7)$$

新的加工点偏差为

$$F_{m+1} = x_{m+1}^2 + y_{m+1}^2 - R^2 = x_m^2 + (y_m + 1)^2 - R^2 = F_m + 2y_m + 1 \quad (3-8)$$

由式(3-6)和(3-8)可知,只要知道前一点的偏差和坐标值,就可求出新的一点的偏差。因为加工点是从圆弧的起点开始,故起点的偏差  $F_0=0$ 。

(2) 终点判断方法

圆弧插补的终点判断方法和直线插补相同。可将  $x$  方向的走步步数  $N_x = |x_e - x_0|$  和  $y$  方向的走步步数  $N_y = |y_e - y_0|$  的总和  $N_{xy}$  作为一个计数器,每走一步,从  $N_{xy}$  中减 1,当  $N_{xy} = 0$  时发出终点到信号。

(3) 插补计算过程

圆弧插补计算过程比直线插补计算过程多一个环节,即要计算加工点瞬时坐标(动点坐标)值,其计算公式为式(3-5)和式(3-7)。因此圆弧插补计算过程分为 5 个步骤即偏差判别、坐标进给、偏差计算、坐标计算、终点判断。

## 2. 四个象限的圆弧插补

其他各象限中逆、顺圆弧都可以同第一象限比较而得出各自的偏差计算公式及进给方

向。前面介绍了第一象限逆圆弧的插补计算,为了导出其他各象限的插补计算,下面先来推导一下第一象限顺圆弧的偏差计算公式。

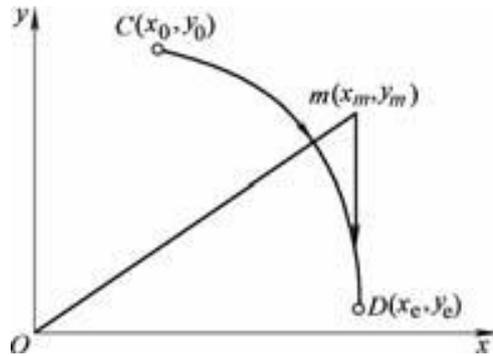


图 3-10 第一象限顺圆弧

(1) 第一象限顺圆弧的插补计算

设第一象限顺圆弧  $\widehat{CD}$ , 圆弧的圆心在坐标原点, 并已知起点  $C(x_0, y_0)$ , 终点  $D(x_e, y_e)$ , 如图 3-10 所示。设加工点现处于  $m(x_m, y_m)$  点, 若  $F_m \geq 0$ , 则沿  $-y$  方向进给一步, 到  $(m+1)$  点, 新加工点坐标将是  $(x_m, y_m - 1)$ , 可求出新的偏差为

$$F_{m+1} = F_m - 2y_m + 1 \quad (3-9)$$

若  $F_m < 0$ , 则沿  $+x$  方向进给一步至  $(m+1)$  点, 新加工点的坐标将是  $(x_m + 1, y_m)$ , 同样可求出新的偏差为

$$F_{m+1} = F_m + 2x_m + 1 \quad (3-10)$$

(2) 四个象限的圆弧插补

式(3-6)、式(3-8)、式(3-9)、式(3-10)给出了第一象限逆、顺圆弧的插补计算公式, 其他象限的圆弧插补可与第一象限的情况相比较而得出, 因为其他象限的所有圆弧总是与第一象限中的逆圆弧或顺圆弧互为对称, 如图 3-11 所示。在图 3-11 中, 用 SR 和 NR 分别表示顺圆弧和逆圆弧, 所以可用  $SR_1$ 、 $SR_2$ 、 $SR_3$ 、 $SR_4$  和  $NR_1$ 、 $NR_2$ 、 $NR_3$ 、 $NR_4$  8 种圆弧分别表示第一至第四象限的顺圆弧和逆圆弧。

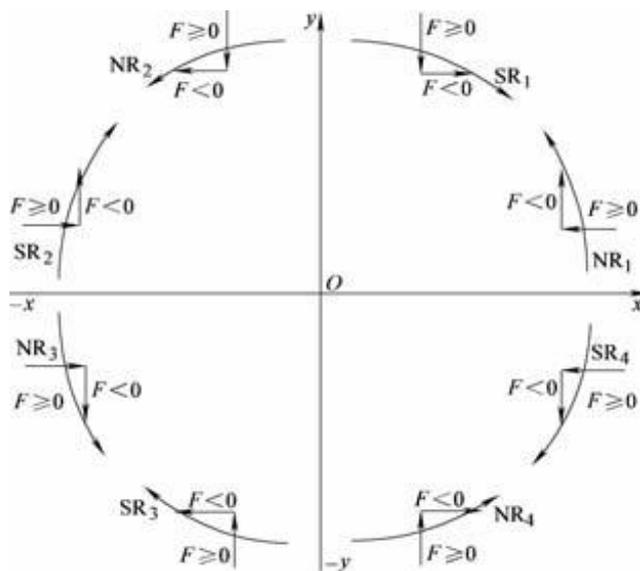


图 3-11 四个象限顺圆弧插补的对称关系

对于图 3-11,  $SR_1$  与  $NR_2$  对称于  $+y$  轴,  $SR_3$  与  $NR_4$  对称于  $-y$  轴,  $NR_1$  与  $SR_4$  对称于  $+x$  轴,  $NR_3$  与  $SR_2$

对称于 $-x$ 轴, $SR_1$ 与 $NR_4$ 对称于 $+x$ 轴, $SR_3$ 与 $NR_2$ 对称于 $-x$ 轴, $SR_2$ 与 $NR_1$ 对称于 $+y$ 轴, $SR_4$ 与 $NR_3$ 对称于 $-y$ 轴。所有四个象限,8种圆弧插补时的偏差计算公式和坐标进给方向见表3-4。

表3-4 圆弧插补计算公式和进给方向

偏差	圆弧种类	进给方向	偏差计算	坐标计算
$F_m \geq 0$	$SR_1, NR_2$	$-y$	$F_{m+1} = F_m - 2y_m + 1$	$x_{m+1} = x_m$ $y_{m+1} = y_m - 1$
	$SR_3, NR_4$	$+y$		
	$NR_1, SR_4$	$-x$	$F_{m+1} = F_m - 2x_m + 1$	$x_{m+1} = x_m - 1$ $y_{m+1} = y_m$
	$NR_3, SR_2$	$+x$		
$F_m < 0$	$SR_1, NR_4$	$+x$	$F_{m+1} = F_m - 2y_m + 1$	$x_{m+1} = x_m$ $y_{m+1} = y_m - 1$
	$SR_3, NR_2$	$-x$		
	$NR_1, SR_2$	$+y$	$F_{m+1} = F_m - 2x_m + 1$ $F_{m+1} = F_m - 2y_m + 1$	$x_{m+1} = x_m - 1$
	$NR_3, SR_4$	$-y$		$x_{m+1} = x_m$

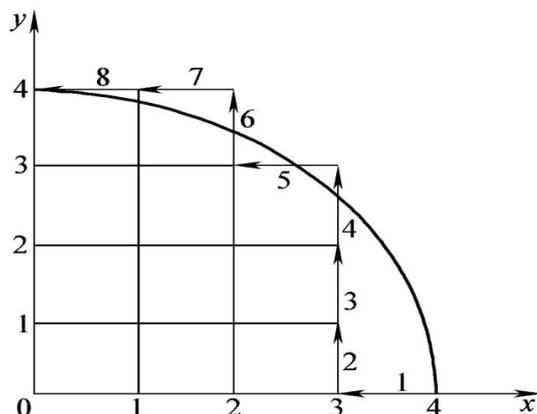
例 设加工第一象限逆圆弧 $\widehat{AB}$ ,已知起点的坐标为 $A(4,0)$ ,终点的坐标为 $B(0,4)$ ,试进行插补计算并作出走步轨迹图。

解 插补计算过程见表3-5。

表3-5 圆弧插补计算过程

步数	偏差判别	坐标进给	偏差计算	坐标计算	终点判断
起点			$F_0 = 0$	$x_0 = 4, y_0 = 0$	$N_{xy} = 8$
1	$F_0 = 0$	$-x$	$F_1 = F_0 - 2x_0 + 1 = -7$	$x_1 = x_0 - 1 = 3, y_1 = 0$	$N_{xy} = 7$
2	$F_1 < 0$	$+y$	$F_2 = F_1 + 2y_1 + 1 = -6$	$x_2 = 3, y_2 = y_1 + 1 = 1$	$N_{xy} = 6$
3	$F_2 < 0$	$+y$	$F_3 = F_2 + 2y_2 + 1 = -3$	$x_3 = 3, y_3 = y_2 + 1 = 2$	$N_{xy} = 5$
4	$F_3 < 0$	$+y$	$F_4 = F_3 + 2y_3 + 1 = 2$	$x_4 = 3, y_4 = y_3 + 1 = 3$	$N_{xy} = 4$
5	$F_4 > 0$	$-x$	$F_5 = F_4 - 2x_4 + 1 = -3$	$x_5 = x_4 - 1 = 2, y_5 = 3$	$N_{xy} = 3$
6	$F_5 = 0$	$+y$	$F_6 = F_5 - F_4 + 2y_5 + 1 = -4$	$x_6 = 2, y_6 = y_5 + 1 = 4$	$N_{xy} = 2$
7	$F_6 < 0$	$-x$	$F_7 = F_6 - 2x_6 + 1 = 1$	$x_7 = x_6 - 1 = 1, y_7 = 4$	$N_{xy} = 1$
8	$F_7 > 0$	$+x$	$F_8 = F_7 - 2x_7 + 1 = 0$	$x_8 = x_7 - 1 = 0, y_8 = 4$	$N_{xy} = 0$

根据表3-5,可作出圆弧插补走步轨迹如图3-12所示。



3-12 圆弧插补走步轨迹图

### 3. 圆弧插补计算的程序实现

#### (1) 数据的输入及存放

在计算机的内存中开辟8个单元 $XO$ 、 $YO$ 、 $NXY$ 和 $ZF$ ,分别存放起点的横坐标 $x_0$ 、起点的纵坐标 $y_0$ 、总步数 $N_{xy}$ 、加工点偏差 $F_m$ 、圆弧种类值 $RNS$ 、 $x_m$ 和 $y_m$ 走步方向标志。这里

$N_{xy} = |x_c - x_0| + |y_c - y_0|$ ,  $RNS$  等于 1、2、3、4 和 5、6、7、8 分别代表  $SR_1$ 、 $SR_2$ 、 $SR_3$ 、 $SR_4$  和  $NR_1$ 、 $NR_2$ 、 $NR_3$ 、 $NR_4$ ,  $RNS$  的值可由起点和终点的坐标的正、负符号来确定,  $F_m$  的初值为  $F_0=0$ ,  $x_m$  和  $y_m$  的初值为  $x_0$  和  $y_0$ ,  $ZF=1、2、3、4$  分别表示  $+x、-x、+y、-y$  走步方向。

### (2) 圆弧插补计算的程序流程

图 3-13 为圆弧插补的程序流程, 该图按照插补计算的 5 个步骤即偏差判别、坐标进给偏差计算、坐标计算、终点判断来实现插补计算程序。

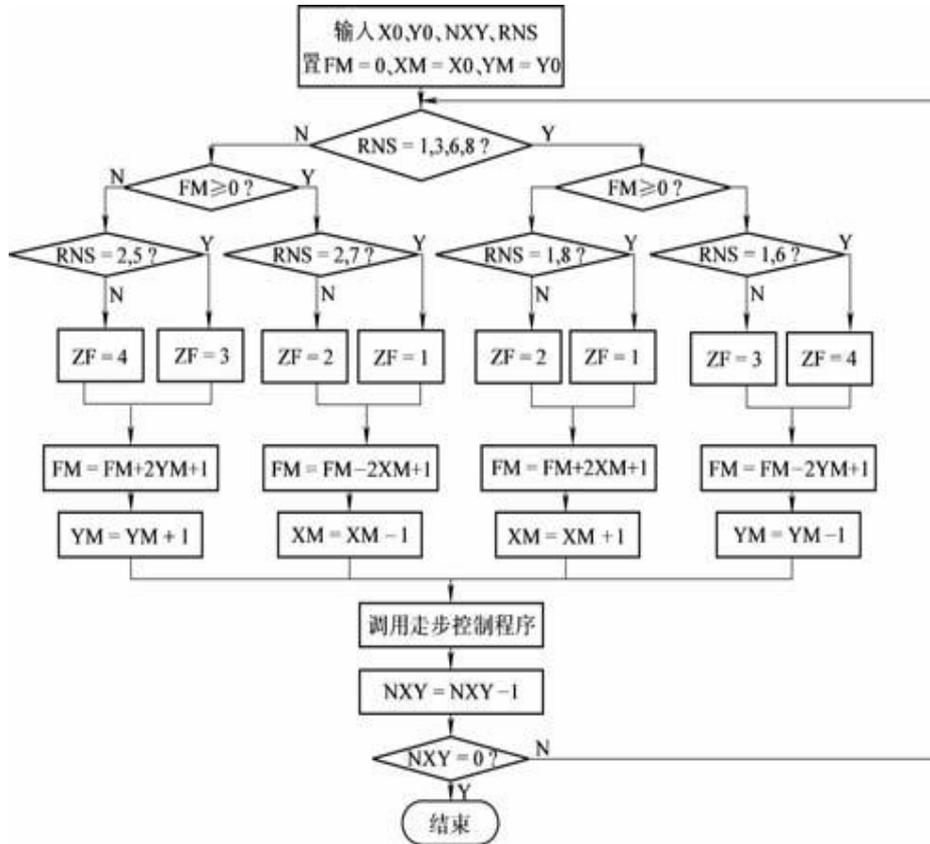


图 3-13 四象限圆弧插补程序流程图

## 授课章节 实验一、逐点比较法直线插补

授课学时	2 学时	授课类型	实验课
实验目的及要求	1.进一步理解逐点比较法直线插补原理； 2.能够在计算机环境中完成逐点比较法直线插补的程序编写，并实现插补计算； 3.通过实验操作，培养学生坚韧不拔的进取精神，同时在解决具体疑难问题可以及时跟老师或组长进行沟通，培养高效沟通的职业素养。		
实验任务	1.根据逐点比较法原理，编写第一象限逐点比较法直线插补程序。 2.根据逐点比较法原理，编写其他象限逐点比较法直线插补程序。		
实验重点与难点	教学重点：第一象限直线插补程序的编写及运行。 教学难点：其他象限直线插补程序的编写及运行。		
教学方法	1.整体采用讲授法+演示方法。 2.实验重点采用任务驱动法和教师启发式教学方法。 3.实验难点采用任务驱动法和自主探究式教学方法。		
教学手段	1.多媒体教学 2.信息化教学：线上教学平台（课前清单内容学习、课堂提问、课堂签到、课后测评及学习等）。		

## 教学实施过程

教学环节	教学内容	教师活动	学生活动	设计意图
课前 ： 线上	了解本次实验的实验任务，实验目标和实验结果等内容。	1.发布实验一实验指导书； 2.发布实验一程序运行效果演示视频。	1.阅读实验一实验指导书； 2.收看实验一程序运行效果演示视频。	1.让学生按照实验指导书要求进行实验预习，并熟知本实验课内容。 2.让学生提前了解实验结果，可使学生对实验结果有正确判断，有利于学生更好的完成实验。

课中：线下	<p><b>思 1</b> 课程导入（10分钟）</p>	<p>任务一、根据逐点比较法原理，编写第一象限逐点比较法直线插补程序</p>	<p>1.提问 1: 直线插补过程； 2.提问 2: 第一象限直线插补流程。</p>	<p>1.思考并回答老师问题 1； 2.思考并回答老师问题 2。</p>	<p>通过提问 1 和 2，检验学生理论课内容学习情况，为本节课学习打下基础。</p>
	<p><b>作 1</b> （20分钟）</p>	<p>（教学重点） 1.复习； 2.完成任务一：编写第一象限直线插补程序； 3.教师进行总结评价； 4. <b>（思政）</b> 通过实验操作，培养学生坚韧不拔的进取精神，同时在解决具体疑难问题可以及时跟老师或组长进行沟通，培养高效沟通的职业素养。</p>	<p>1.操作 1：在 Matlab 中，如何完成一条直线的绘制； 2.教师讲授本程序共分为 3 大部分及每部分功能：赋初值，循环体和画图，并对关键语句进行提示； 3.操作 2: 要求学生完成第一象限直线插补程序并运行。</p>	<p>1.学生在 matlab 中完成直线绘制程序编写； 2.了解程序功能模块，对程序设计构建基本框架； 3.完成第 1 象限直线插补程序。</p>	<p>1.通过操作 1，学生了解做图方法，为直线插补做图提供基础； 2.以任务驱动学生学习，引导学生进行自主探究学习，培养学生独立分析问题的能力，突显了实验课学生主体地位。</p>
	<p><b>评 1</b> （15分钟）</p>		<p>1.教师总结学生操作过程中遇到的问题，进行统一说明； 2.教师根据学生完成情况进行点评与总结。</p>	<p>1.学生根据教师的总结，反思自身遇到的问题，加深正确解决方法的印象； 2.通过了解其他同学的完成情况，对自身能力进行清晰判断。</p>	<p>1.检验学生的学习成果、发现问题，增进理解。 2.学生之间形成相互对照，便于及时发现问题，找出原因。</p>
	<p>间歇 5 分钟</p>				
<p><b>思 2</b> （10分钟）</p>	<p>任务二、根据逐点比较法原理，编写其他象限逐点比较法直线插补程序。</p>	<p>1.提问 1: 其他象限与第一象限插补流程的相同点和不同点； 2.提问 2: 这些相</p>	<p>学生思考并回答老师问题 1</p>	<p>通过提问 1，检验学生理论课内容学习情况，为本节课学习打下基础。</p>	

	(教学难点) 1.温习 4 象限直线插补关系;	同点和不同点在程序中如何体现。		
<b>作 2</b> (20 分钟)	2.完成任务二:编写其他象限直线插补程序; 3.教师进行总结评价。 4. <b>(思政)</b> 通过实验操作,培养学生坚韧不拔的进取精神,同时在解决具体疑难问题可以及时跟老师或组长进行沟通,培养高效沟通的职业素养。	1.操作 1: 在 Matlab 中,如何判断坐标点在不同象限; 2.教师讲授本程序共分为 3 大部分及每部分功能:赋初值,循环体和画图,并对关键语句进行提示; 3.操作 2:要求学生完成其他象限直线插补程序并运行。	1.学生在 matlab 中完成坐标点所属象限程序编写; 2.了解程序功能模块,对程序设计构建基本框架; 3.完成其他象限直线插补程序。	1.通过操作 1,学生了解不同象限区别方法,为下一步编程提供基础; 2.以任务驱动学生学习,引导学生进行自主探究学习,培养学生独立分析问题的能力,突显了实验课学生主体地位。
<b>评 2</b> (15 分钟)		1.教师总结学生操作过程中遇到的问题,进行统一说明; 2.教师根据学生完成情况进行点评与总结。	1.学生根据教师的总结,反思自身遇到的问题,加深正确解决方法的印象; 2.通过了解其他同学的完成情况,对自身能力进行清晰判断。	1.检验学生的学习成果、发现问题,增进理解。 2.学生之间形成相互对照,便于及时发现问题,找出原因。
<b>课后线上</b>	1.撰写并提交实验报告; 2.学生完成本章线上平台思政内容的学习; 3.学生阅读线上平台实验一拓展材料的阅读,以加深本节课程所学知识的理解; 4.教师基于线上平台和微信进行答疑; 5.教师布置下次课预习任务。			
<b>拓展阅读</b>				
MATLAB 深入学习 S6: 数字控制技术—逐点比较法插补原理 <a href="https://blog.csdn.net/K2Fe2O7/article/details/120913749?ops_request_misc=%257B%2522requ">https://blog.csdn.net/K2Fe2O7/article/details/120913749?ops_request_misc=%257B%2522requ</a>				

```
est%255Fid%2522%253A%2522166903159816800186510196%2522%252C%2522scm%2522%253A%252220140713.130102334..%2522%257D&request_id=166903159816800186510196&biz_id=0&utm_medium=distribute.pc_search_result.none-task-blog-2~all~sobaiduend~default-1-120913749-null-null.142^v66^control,201^v3^control,213^v2^t3_control1&utm_term=%E9%80%90%E7%82%B9%E6%AF%94%E8%BE%83%E6%B3%95%20matlab&spm=1018.2226.3001.4187
```

## 教学反思

- 1.本次课程是理论课内容的具体实操课程，通过具体实践将理论所学内容进行应用。课堂通过导入，任务驱动式教学，学生很好进入实践操作情境。
- 2.本次实验课充分调动学生的动手能力，逻辑思维能力，如何更能充分发挥学生能动性，将程序全部进行自行设计还需进行教学再思考再设计。

## 本实验具体程序如下：

### 任务一、第一象限直线插补程序

```
clear all; %清除工作空间的所有变量和函数;
clc;      %清除命令窗口的内容;
F=0;     %定义偏差;
x=0;     %定义初始值 x;
y=0;     %定义初始值 y;
dx=1;    %定义 x 方向步长;
dy=1;    %定义 y 方向步长;
xe=6;    %x 终点坐标;
ye=4;    %y 终点坐标;
K=ye/xe; %斜率;
xx(1)=x; %xx 数组存储逐步插补过程中的 x 坐标;
yy(1)=y; %yy 数组存储逐步插补过程中的 y 坐标;
index=2; %xx 数组和 yy 数组存储数据从第 2 个开始，之前已经有了。
xx(1)=x, yy(1)=y;
{while(1)
if(F>=0)      %Fm>=0;
if(xe>0)
x=x+dx;      %进给方向+x;
end
y=y;         %y 值不变;
F=F-ye;     %偏差计算  Fm+1=Fm-y;
else        %Fm<0;
if(ye>0)
y=y+dy;%进给方向+y;
end
x=x;        %x 值不变;
F=F+xe;     %偏差计算  Fm+1=Fm+x;
```

```

end
xx(index)=x; %保存插补过程中的 x 坐标;
yy(index)=y; %保存插补过程中的 y 坐标;
index=index+1;%存储过程坐标的数组索引自加, xx, yy;
if((x+y)>=(xe+ye)) %终点判别;
break; %到达终点, 则跳出循环;
end
End}
figure(1) %创建目标图窗, 1 号图窗;
hold on %保持原图并接受此后绘制的新曲线,叠加绘图; 多次叠绘;
box on %绘制图窗边框;
xlabel('x') %x 轴标签;
ylabel('y') %y 轴标签;
grid on %网格表示;
plot(xx,yy,'r'); %绘制插补直线

```

## 任务二、其他象限直线插补程序

```

clear all;%清除工作空间的所有变量和函数;
clc %清除命令窗口的内容;
F=0; %定义偏差;
x=0; %定义初始值 x;
y=0; %定义初始值 y;
x0=0; %定义初始值 x0;
y0=0; %定义初始值 y0;
dx=1; %定义 x 方向步长;
dy=1; %定义 y 方向步长;
xe=-6;%x 终点坐标;
ye=-4; %y 终点坐标;
K=ye/x; %斜率;
xx(1)=x;%xx 数组存储逐步插补过程中的 x 坐标;
yy(1)=y;%yy 数组存储逐步插补过程中的 y 坐标;
index=2;%xx 数组和 yy 数组存储数据从第 2 个开始, 之前已经有了
xx(1)=x, yy(1)=y;
{while(1)
if(F>=0) %Fm>=0;
if(xe>0) %第一、四象限;
x=x+dx; %进给方向+x;
else %第二、三象限;
x=x-dx; %进给方向-x;
end
y=y; %y 值不变;
F=F-abs(y); %偏差计算 Fm+1=Fm-y;
else %Fm<0;
if(ye>0) %第一、二象限;
y=y+dy;%进给方向+y;
else %第三、四象限;

```

```
y=y-dy; %进给方向-y;
end
x=x;      %x 值不变;
F=F+abs(xe); %偏差计算 Fm+1=Fm+x;
end
xx(index)=x; %保存插补过程中的 x 坐标;
yy(index)=y; %保存插补过程中的 y 坐标;
index=index+1;%存储过程坐标的数组索引自加, xx, yy;
if((abs(x)+abs(y))>=(abs(xe)+abs(ye))) %终点判别;
break; %到达终点, 则跳出循环;
end
end}
figure(1) %创建目标图窗, 1 号图窗;
hold on %保持原图并接受此后绘制的新的曲线,叠加绘图; 多次叠绘;
box on %绘制图窗边框;
xlabel('x') %x 轴标签;
ylabel('y') %y 轴标签;
grid on %网格表示;
plot(xx,yy,'r');
```

## 授课章节 实验二、逐点比较法圆弧插补

授课学时	2 学时	授课类型	实验课
实验目的及要求	1.进一步理解逐点比较法圆弧插补原理； 2.能够在计算机环境中完成逐点比较法圆弧插补的程序编写，并实现插补计算； 3.通过实验操作，培养学生坚韧不拔的进取精神，同时在解决具体疑难问题可以及时跟老师或组长进行沟通，培养高效沟通的职业素养。		
实验任务	1.根据逐点比较法原理，编写第一象限逐点比较法圆弧插补程序。 2.根据逐点比较法原理，编写其他象限逐点比较法圆弧插补程序。		
实验重点与难点	教学重点：第一象限圆弧插补程序的编写及运行。		
	教学难点：其他象限圆弧插补程序的编写及运行。		
教学方法	1.整体采用讲授法+演示方法。 2.任务驱动法启发式教学方法。 3.自主探究式教学方法。		
教学手段	1.多媒体教学 2.信息化教学：线上教学平台（课前清单内容学习、课堂提问、课堂签到、课后测评及学习等）。		

## 教学实施过程

教学环节	教学内容	教师活动	学生活动	设计意图
课前 ： 线上	了解本次实验的实验任务，实验目标和实验结果等内容。	1.发布实验二实验指导书； 2.发布实验二程序运行效果演示视频。	1.阅读实验二实验指导书； 2.收看实验二程序运行效果演示视频。	1.让学生按照实验指导书要求进行实验预习，并熟知本实验课内容。 2.让学生提前了解实验结果，可使学生对实验结果有正确判断，有利于学生更好的完成实验。

课中： 线下	<b>思 1</b> 课程导入（10分钟）	任务一、根据逐点比较法原理，编写第一象限逐点比较法圆弧插补程序  (教学重点)	1.提问 1: 圆弧插补过程; 2.提问 2: 第一象限圆弧插补流程。	1.思考并回答老师问题 1; 2.思考并回答老师问题 2。	通过提问 1 和 2, 检验学生理论课内容学习情况, 为本节课学习打下理论基础。	
	<b>作 1</b> (20分钟)	1.复习; 2.完成任务一: 编写第一象限圆弧插补程序; 3.教师进行总结评价; 4. <b>(思政)</b> 通过实验操作, 培养学生坚韧不拔的进取精神, 同时在解决具体疑难问题可以及时跟老师或组长进行沟通, 培养高效沟通的职业素养。	1.操作 1: 在 Matlab 中, 如何完成一条圆弧的绘制; 2.教师讲授本程序共分为 3 大部分及每部分功能: 赋初值, 循环体和画图; 3.操作 2: 要求学生完成第一象限圆弧插补程序并运行。	1.学生在 matlab 中完成圆弧绘制程序编写; 2.了解程序功能模块, 对程序设计构建基本框架; 3.完成第 1 象限圆弧插补程序。	1.通过操作 1, 学生了解做图方法, 为圆弧插补做图提供基础; 2.以任务驱动学生学习, 引导学生进行自主探究学习, 培养学生独立分析问题的能力, 突显了实验课学生主体地位。	
	<b>评 1</b> (15分钟)	老师或组长进行沟通, 培养高效沟通的职业素养。	1.教师总结学生操作过程中遇到的问题, 进行统一说明; 2.教师根据学生完成情况进行点评与总结。	1.学生根据教师的总结, 反思自身遇到的问题, 加深正确解决方法的印象; 2.通过了解其他同学的完成情况, 对自身能力进行清晰判断。	1.检验学生的学习成果、发现问题, 增进理解。 2.学生之间形成相互对照, 便于及时发现问题, 找出原因。	
	午休 5 分钟					
	<b>思 2</b> (10分钟)	任务二、根据逐点比较法原理, 编写其他象限逐点比较法圆弧插补程序。  (教学难点) 1.温习 4 象限圆	1.提问 1: 其他象限与第一象限插补流程的相同点和不同点; 2.提问 2: 这些相同点和不同点在程序中如何体	学生思考并回答老师问题 1	通过提问 1, 检验学生理论课内容学习情况, 为本节课学习打下基础。	

		弧插补关系；	现。		
	<b>作 2</b> (20 分钟)	2.完成任务二：编写其他象限圆弧插补程序； 3.教师进行总结评价。 4. <b>(思政)</b> 通过实验操作，培养学生坚韧不拔的进取精神，同时在解决具体疑难问题可以及时跟老师或组长进行沟通，培养高效沟通的职业素养。	1.教师讲授本程序共分为 3 大部分及每部分功能：赋初值，循环体和画图； 2.操作 1: 要求学生完成其他象限圆弧插补程序并运行。	1.了解程序功能模块，对程序设计构建基本框架； 2.操作 1: 完成其他象限圆弧插补程序。	1.程序功能的说明为学生更好更快的完成实验打下基础； 2.以任务驱动学生进行实验操作学习，引导学生进行自主探究学习，培养学生独立分析问题的能力，突显了实验课学生主体地位。
	<b>评 2</b> (15 分钟)		1.教师总结学生操作过程中遇到的问题，进行统一说明； 2.教师根据学生完成情况进行点评与总结。	1.学生根据教师的总结，反思自身遇到的问题，加深正确解决方法的印象； 2.通过了解其他同学的完成情况，对自身能力进行清晰判断。	1.检验学生的学习成果、发现问题，增进理解。 2.学生之间形成相互对照，便于及时发现问题，找出原因。
<b>课后： 线上</b>	1.撰写并提交实验报告； 2.学生完成本章线上平台思政内容的学习； 3.学生阅读线上平台实验一拓展材料的阅读，以加深本节课程所学知识的理解； 4.教师基于线上平台和微信进行答疑； 5.教师布置下次课预习任务。				
<b>拓展阅读</b>					
Matlab 圆弧插补逐点比较法 <a href="https://blog.csdn.net/weixin_39915815/article/details/116157555?ops_request_misc=%257B%2522request%25Fid%2522%253A%2522166903162416782429778701%2522%252C%2522scm%2522%253A%252220140713.130102334.pc%255Fblog.%2522%257D&amp;request_id=166903162416782429778701&amp;biz_id=0&amp;utm_medium=distribute.pc_search_result.none-task-blog-2~b">https://blog.csdn.net/weixin_39915815/article/details/116157555?ops_request_misc=%257B%2522request%25Fid%2522%253A%2522166903162416782429778701%2522%252C%2522scm%2522%253A%252220140713.130102334.pc%255Fblog.%2522%257D&amp;request_id=166903162416782429778701&amp;biz_id=0&amp;utm_medium=distribute.pc_search_result.none-task-blog-2~b</a>					

log~first\_rank\_ecpm\_v1~hot\_rank-1-116157555-null-null.nonecase&utm\_term=%E9%80%90%E7%82%B9%E6%AF%94%E8%BE%83%E6%B3%95%20matlab&spm=1018.2226.3001.4450

## 教学反思

- 1.本次课程是理论课内容的具体实操课程，通过具体实践将理论所学内容进行应用。课堂通过导入，任务驱动式教学，学生很好进入实践操作情境。
- 2.本次实验课将圆弧插补过程进行编程，目前还是在 **matlab** 上进行仿真实验，下一步如何进行更形象化仿真实验有待进一步探究和思考。初步考虑在 **matlab** 编程基础上，教师利用专业软件进行模拟刀具切割运行来实现理论的最大实践化。

## 本实验具体程序如下：

### 任务一、第一象限圆弧插补程序

```
x0=0;
y0=5;
x1=5;
y1=0;
%以下程序是将图形限制在 area 区域内，并且将网格间距调整为 1 个单位长度
area=max(max(x0,y0),max(x1,y1));
plot([0 0],[area area]);
grid on
set(gca,'XTick',[0:1:area])
set(gca,'YTick',[0:1:area])
hold on;
{r=sqrt(y0^2 + x0^2);      %求圆的半径
theta0=atan(x0/y0);
theta1=atan(x1/y1);
theta=theta0:0.01:theta1
dx=r*cos(theta);
dy=r*sin(theta);
plot(dx,dy);
hold on;
%以下部分程序是模拟走刀路径
num=abs(x0+x1)+abs(y0-y1);
px=x0;
py=y0;
rxy=r;      %当前位置离圆心距离，初始化为 r
for i=1:num
lastX=px;
lastY=py;      %lastX, lastY 为走刀之前的位置坐标
if (rxy<r)
px=px+1;
else
py=py-1;
```

```

end}
line([lastX px],[lastY py],'Marker','!','Color','r','LineStyle','-','LineWidth',2);
rxy = sqrt(px^2+py^2);
pause(.5);    %每走一步暂停 0.5 秒
end

```

## 任务二、其他象限圆弧插补程序

```

clear all; %清除工作空间的所有变量和函数;
close all %关闭一个或多个图窗;
x0=5;    %定义初始值 x;
y0=0;    %定义初始值 y;
x1=0;    %定义终点值 x;
y1=5;    %定义终点值 y;
%=====图像相关=====
figure(1) %产生图窗;
hold on; %保持原图并接受此后绘制的新的曲线,叠加绘图; 多次叠绘;
box on; %显示坐标区轮廓,即增加坐标系边框;
area=max(max(x0,y0),max(x1,y1));%将图形限制在 area 区域内;
plot([0 0],[area area]); %画出从起点到终点的直线;
grid on %显示坐标区网格线;
hold on; %保持原图并接受此后绘制的新的曲线,叠加绘图; 多次叠绘;
set(gca,'XTick',[0:1:area]) %网格间距调整为 1 个单位长度;
set(gca,'YTick',[0:1:area]) %网格间距调整为 1 个单位长度;
%=====标记起点和终点=====
plot(x0,y0,'o','MarkerSize',10, 'MarkerEdgeColor','b', 'MarkerFaceColor','b'); %标记圆弧插补起
点;
plot(x1,y1,'o','MarkerSize',10, 'MarkerEdgeColor','b', 'MarkerFaceColor','b'); %标记圆弧插补终
点;
%=====以下部分程序是画出需要加工的工件轮廓, 类似描点法
r=sqrt(y0^2 + x0^2); %求圆的半径;
theta0=atan(y0/x0); %起点斜率;
theta1=atan(y1/x1); %终点斜率;
theta=theta0:0.01:theta1;%在起点和终点之间产生一系列的点;
dx=r*cos(theta); %产生点的 x 值;
dy=r*sin(theta); %产生点的 y 值;
plot(dx,dy); %画出圆弧;
hold on;
%=====以下部分程序是模拟走刀路径
num=abs(x0-x1)+abs(y0-y1); %定义总的插补步数
px=x0; py=y0; %定义初始点 x, y;
rxy=r; %当前位置离圆心距离, 初始化为 r;
for i=1:num %开始循环;
    lastX=px; %lastX, lastY 为走刀之前的位置坐标;
    lastY=py; %lastX, lastY 为走刀之前的位置坐标;
    if (rxy<r) %在圆弧内部
        py=py+1; %Y 方向进给加 1;

```

```
else
    px=px-1; %X 方向进给减 1;
end
    %结束循环;
plot([lastX px],[lastY py],'r-<','MarkerSize',4,'MarkerEdgeColor','r',
'MarkerFaceColor','r'); %绘制插补线上的进给方向，用箭头标注。
rxy=sqrt(px^2+py^2);
pause(.5); %每走一步暂停 0.5 秒
end
```