

第二批国家级一流本科课程申报书

(线下课程)

课程名称：机器人原理及应用

专业类代码：0802

课程负责人：王鹏

联系电话：13679107835

申报学校：西安航空学院

填表日期：2021年5月10日

推荐单位：陕西省教育厅

中华人民共和国教育部制
二〇二一年四月

填报说明

1.专业类代码指《普通高等学校本科专业目录（2020）》中的专业类代码（四位数字）。

2.以课程团队名义申报的，课程负责人为课程团队牵头人；以个人名义申报的，课程负责人为该课程主讲教师。团队主要成员一般为近5年内讲授该课程教师。

3.申报课程名称、所有团队主要成员须与教务系统中已完成的学期一致，并须截图上传教务系统中课程开设信息。



4.文中○为单选；□可多选。

5.文本中的中外文名词第一次出现时，要写清全称和缩写，再次出现时可以使用缩写。

6.具有防伪标识的申报书及申报材料由推荐单位打印留存备查，国家级评审以网络提交的电子版为准。

7.涉密课程或不能公开个人信息的涉密人员不得参与申报。

一、课程基本信息

课程名称	机器人原理及应用	是否曾被推荐	<input type="radio"/> 是 <input checked="" type="radio"/> 否
课程负责人	王鹏		
负责人所在单位	西安航空学院机械工程学院		
课程编码+选课编码 (教务系统中的编码)	B0212010+B0212010.01		
课程分类	<input type="radio"/> 通识课 <input type="radio"/> 公共基础课 <input checked="" type="radio"/> 专业课 <input type="checkbox"/> 思想政治理论课 <input type="checkbox"/> 创新创业教育课 <input type="checkbox"/> 教师教育课 <input type="checkbox"/> 实验课		
	课程性质 <input checked="" type="radio"/> 必修 <input type="radio"/> 选修		
开课年级	本科三年级		
面向专业	机器人工程		
学时	48		
学分	3		
先修(前序)课程名称	理论力学、材料力学、工程测试技术、机电控制工程基础		
后续课程名称	工业机器人末端执行器设计、工业机器人编程技术		
主要教材	《工业机器人》、9787568053891、韩建海、华中科技大学出版社、2015年7月(封面及版权页见附件12)		
最近两期开课时间	2019年3月3日—2019年5月21日 课程名称《机器人原理及应用》 教师名称 王鹏 		
	2020年2月24日—2020年5月14日 课程名称《机器人原理及应用》 教师名称 王鹏 		

最近两期学生人数	131
----------	-----

注：2020年春季学期，因受新冠肺炎疫情影响而采用在线方式进行授课的，如符合教改设计理念并取得预期效果，可视为完成一个教学周期；教务系统截图须至少包含课程编码、选课编码、开课时间、授课教师姓名等信息。

二、授课教师（教学团队）

课程团队主要成员（序号 1 为课程负责人，总人数限 5 人之内）								
序号	姓名	出生年月	单位	职务	职称	手机号码	电子邮箱	授课任务
1	王鹏	1983.11	机械工程学院	教师	副教授	13484930663	85281325@qq.com	理论教学
2	王莹	1979.11	机械工程学院	教研室主任	副教授	13669180176	29444590@qq.com	现场教学
3	王晋鹏	1982.3	机械工程学院	教师	讲师	17791605706	27509525@qq.com	现场教学
4	王瑜	1981.10	机械工程学院	教师	副教授	13892831636	418502313@qq.com	现场教学
5	李阿为	1990.3	机械工程学院	教师	讲师	15129058515	674992317@qq.com	现场教学
课程负责人和团队其他主要成员教学情况（500 字以内）								
<p>（教学经历：近 5 年来在承担该门课程教学任务、开展教学研究、获得教学奖励方面的情况）</p> <p>本人 2009 年在西安航空学院参加工作，曾任机械工程学院辅导员、机械基础教研室主任、机器人工程教研室主任。近五年主讲本科课程包括：《机械设计基础》《机械原理》《工业机器人原理及应用》等主干课程的理论课教学任务。2014 年获校级教学竞赛一等奖，2017 年获西安航空学院青年教师教学质量优秀奖，2019 年获西安航空学院教学质量优秀奖，主编《机械基础综合实验教程》校内实验指导书一部，作为负责人获批 1 项校级教学成果奖二等奖；完成质量工程项目《机械设计基础》核心课程建设参与 2018 年度陕西省创新创业课程《机械创新设计》建设项目。负责省教育厅项目 1 项，参与省教育厅科学研究课题 2 项；参与省科技厅项目 1 项；以第一作者公开发表学术论文 10 余篇，教改论文 1 篇。</p> <p>课程团队人员，近年来发表教学改革论文 2 篇，承担校级科研项目 3 项，横向科研经费到账 5 万元，发表科研论文 10 余篇，其中 SCI 1 篇，EI 2 篇，CSCD 2 篇，其余文章均为核心论文。王莹老师获 2020 年校级课堂创新大赛一等奖，王晋鹏老师完成《机械原理》课程思政校级示范课建设。</p>								

三、课程目标（300 字以内）

(结合本校办学定位、学生情况、专业人才培养要求,具体描述学习本课程后应该达到的知识、能力水平)

西安航空学院是一所应用型本科院校,结合学校办学定位,2017年获批机器人工程专业开始招生。本专业培养目标是具备非标准末端执行器机械设计的能力,工业机器人编程能力以及工业机器人智能产线集成的能力。

本课程是机器人工程专业的专业核心课。本课程主要介绍工业机器人的基础知识,主要涉及工业机器人机械系统末端执行器、工业机器人运动学、检测控制系统、典型智能产线中机器人的轨迹规划和应用。

本课程目标分为知识目标与素质目标。知识目标包括:能够熟悉工业机器人的发展和一般组成,运用所学专业知 识针对工业机器人工程技术问题进行提炼和分析,为智能产线的集成打下基础;能够运用工程数学基本知识用于表达工业机器人运动学问题和轨迹规划问题,并能求解,为产线中工业机器人的应用打下基础;同时要求,学生在机器人工程专业实践的背景下,具有跟踪机器人工程领域前沿、发展趋势的能力,能恪守专业领域的技术标准和行业准则,完成机器人工程技术人员科技报国的使命担当和社会责任,针对个人和专业发展需求,养成终身学习的习惯。

四、课程建设及应用情况(2000字以内)

(本课程的建设发展历程,课程与教学改革要解决的重点问题,课程内容与资源建设及应用情况,课程教学内容及组织实施情况,课程成绩评定方式,课程评价及改革成效等情况)

(一)本课程发展历程

我校从2017年招收机器人工程专业学生,在2018-2019-2学期首次开设了《机器人原理及应用》这门课程,结合我校始终围绕立德树人根本任务,坚持培养高素质应用型人才的人才培养定位,聘请企业专家和校内专家共同制定了该课程教学大纲,注重了实践教学体系、动手能力培养,并采用多媒体教学,提高教学质量。

通过开放实验,增加现场教学的教学比例,不断加强实践教学投入,购置了新的实验台、仪器,由原来的无一台实验设备发展成具有现代化的实验教学基地,实验设备齐全、完整,为实验教学改革创造了条件。

(二)本课程教学改革重点问题

优化调整教学内容:以现代智能制造企业需求将教学内容重构为4大模块,在课程学习的同时达到信息获取能力,良好职业行为,团结协作精神,自我学习能力的素质目标。

课程案例化、专题化探索:在“厚基础、重实践、能创新、高素质”目标指导下,强调理论的应用性与技术的先进性。依托广州瑞松北斗科技有限公司、上海塔普公司、西安吉利汽车有限公司的校企合作优势,紧密联系现代智能制造的产业优势,引入设计案例,突出教学的实用性。

探寻全新的课程实施过程:在课程的实施上探寻教、学、做一体化模式,基于工作过程进行教学模式设计,以典型装备为载体,实现六步教学法资讯、决策、计划、实施、检查、评价。

(三)课程内容与资源建设及应用情况

邀请企业专家和兄弟院校专家按照行业标准和企业需求制定了课程大纲。以航空制造企业生产过程装备需求为基础，将教学内容重构为4大模块，工业机器人基础知识模块，工业机器人分析模块，工业机器人控制模块，智能生产线工业机器人应用模块。

本课程经过两年的建设，充分运用先进技术，实现了文字教材与电子和网络教材的结合，构建了内容丰富、集文字与图片、二维与三维动画、视频、虚拟现实等多种媒体素材为一体的立体化教学系统。提供了虚拟实习，学生综合技能训练和实验动手能力与创新意识得到了提高和培养，提高学生综合解决实际问题的能力。

（四）成绩评定方式，课程评价

本课程考核方式分为考试，总成绩为百分制，包括平时成绩和期末考试卷面成绩两部分，其中平时成绩包括学习态度、作业、课堂提问、实验等，占总成绩的30%，期末考试卷面成绩占总成绩的70%。

（五）改革成效等情况

1、德育为先、能力为重、全面发展的教育理念得到普遍认同：课程组始终围绕立德树人根本任务将“课程思政”引入课堂教学，坚持贯彻习近平总书记在全国高校思想政治工作会议上讲话，深刻挖掘《机器人原理及应用》蕴含的政治元素，将“课程思政”引入专业教育，构建协同、有效、有力的思政教育大格局。有效的在进行专业教育的同时提高了学生的思想政治道德素质。

2、教师实践能力普遍加强。课程团队教师暑假参与企业实践，提高了教师的实践能力。

3、学生参与课堂讨论的积极性有效提高。教学手段上采用了任务驱动法教学，多媒体教学法，讲练结合实物，打破了课堂沉默状态，焕发了课堂生机活力，较好的发挥了线下课堂教学主阵地、主渠道，主战场的作用。

4、为了提高学生的实际应用能力，在本门课程的教学进行了基于学科竞赛和能力证书双驱动的“理实”一体化教学改革。主要改革措施包括：(1)在课堂教学中以“1+X”证书制度中的知识点要求为主线，为后期学生考取能力证书提供扎实的基础知识。(2)将部分理论课时安排在实验室完成，以实验室中的设备为例讲解相关理论知识，提高学生对知识的掌握程度。(3)在课堂教学中采用雨课堂等现代化进行教学，提升教学效果。(4)积极鼓励学生参加学科竞赛，近年来先后在中国工程机器人大赛暨国际公开赛中获得国家级一等奖11项，二等奖7项，三等奖9项，在全国大学生工程训练综合能力竞赛陕西赛区获得省级二等奖1项，第九届全国大学生机械创新设计大赛陕西赛区获得省级二等奖1项，第四届“互联网+”大学生创新创业大赛中获得省级三等奖1项。

五、课程特色与创新（500字以内）

（概述本课程的特色及教学改革创新点）

1. 构建适用于应用型本科的课程体系

面向应用型本科学生，以培养学生综合应用能力为主线，厚基础，宽口径，围绕办学定位和专业人才培养目标，确定本课程的主要内容和体系结构。

2. 充分利用校企合作资源优势，坚持实物教学、工程案例教学

通过工业机器人产品、生产现场视频、虚拟制造视频以及企业实际项目等典型实例贯穿整个教学过程，架起了学生感性认识与企业实际生产之间的桥梁，加深学生对所学知识的理解，实现学以致用。

3. 充分利用网络资源，实现线下课内和线上课外的有机融合

线下课堂教学充分利用本地数字电子资源、校企合作相关案例和实验室等资源，依托雨课堂进行互动授课；线上课外辅导，充分利用网络资源，利用现代化教学工具实现线上预习、作业、答疑，反馈，构建全方位立体化教学环境。

4. 坚持学科竞赛驱动教学，培养学生工程实践能力

团队教师积极投身大学生各类学科竞赛活动，通过学科竞赛将“学与做”融为一体，切实提高学生实践动手能力，突出应用型人才培养。

5. “课程思政”引入课堂教学

《机器人原理及应用》深入挖掘课程蕴含的思政元素，将“课程思政”引入专业教育，构建“三全育人”大格局。在进行专业教育的同时，提高了学生的思想政治道德素质，实现教书与育人相统一，“知识传授”与“价值引领”相统一。

六、课程建设计划（500字以内）

（今后五年课程的持续建设计划、需要进一步解决的问题，改革方向和改进措施等）

（1）切实加强教师队伍建设

机器人属于交叉学科的典型装备，加强师资建设，在坚持学校鼓励教师假期企业实践的制度下，通过一流课程建设逐步形成一支学科融合度高、结构合理、人员稳定、教学水平高、教学效果好的教学梯队。

（2）重视教学内容和课程体系改革

要准确定位一流课程在人才培养过程中的地位和作用，一流课程的内容要体现现代教育理念和时代要求，始终保持先进性，要及时反映本学科领域的最新科研成果，课程内容体现新时代社会、政治、经济、科技的发展对人才培养目标的支撑。

（3）重视教材建设

努力编写适合于应用型本科院校的一流教材，开发网络课件，建成由文字教材、电子教材、网络课件、试题库、系列参考书和辅助教材等构成的立体化教材。

（4）注重使用现代化的教学方法与手段

充分利用现代教育技术手段开展教学，实现各类教学资源共享，力争实现“线下课程”向“线上线下混合式教学”发展。

（5）坚持强化实践教学环节

高度重视实验、实习等实践性教学环节，大力开展实践教学改革，开设设计性、综合性、研究性试验。

（6）坚持培育课程特色

在今后的五年持续加强在教学内容、教学方法与手段、实践教学、考试模式等方面的改革，形成应用型本科院校的风格和特色。

七、附件材料清单

1. 课程负责人和团队成员的 10 分钟“说课”视频

[含课程概述、教学设计思路、教学环境（课堂或线上或实践）、教学方法、创新特色、教学效果评价与比较等。技术要求：分辨率 720P 及以上，MP4 格式，图像清晰稳定，声音清楚。视频中标注出镜人姓名、单位，课程负责人出镜时间不得少于 3 分钟。“说课”使用的语言及字幕为国家通用语言及文字。]

附件 1. 课程负责人说课视频

在评审过程中如果视频无法打开

请访问：<http://xaau.fanya.chaoxing.com/portal>

搜索机器人原理及应用，点击进入，在页面最下方点击《机器人原理及应用》10 分钟说课视频。



2. 教学设计样例说明

（提供一节代表性课程的完整教学设计和教学实施流程说明，尽可能细致地反映出教师的思考和教学设计，在文档中应提供不少于 5 张教学活动的图片。要求教学设计样例应具有较强的可读性，表述清晰流畅。课程负责人签字。）

附件 2. “工业机器人基础知识”教学设计方案

3. 最近一学期的教学日历

（申报学校教务处盖章。）

附件 3. 2019-2020-2 学期教学日历

4. 最近一学期的测验、考试（考核）及答案（成果等）

（申报学校教务处盖章。）

附件 4. 2019-2020-2 学期期末考试试题（含 A、B 卷及答案评分标准）

5. 最近两学期的学生成绩分布统计

（申报学校教务处盖章。）

附件 5. 2018-2019-2、2019-2020-2 学期期末考试成绩统计含卷面成绩分析表

6. 最近一学期的课程教案

（课程负责人签字。）

附件 6. 2019-2020-2 学期课程教案

7. 最近一学期学生评教结果统计

（申报学校教务处盖章。）

附件 7. 2019-2020-2 学期学生评教结果

8. 最近一次学校对课堂教学评价

(申报学校教务处盖章。)

附件 8. 2019-2020-2 学期学院领导听课评价表

9. 教学(课堂或实践)实录视频

提供完整的一节课堂实录视频(标注课程内容、课程对象、上课时间以及上课地点,至少 40 分钟。技术要求:分辨率 720P 及以上,MP4 格式,图像清晰稳定,声音清楚。教师必须出境,视频中需标注教师姓名、单位;要有学生的镜头,并须告知学生可能出现在视频中,此视频会公开。少数民族语言视频须配国家通用语言字幕。)

在评审过程中如果视频无法打开

请访问:<http://xaau.fanya.chaoxing.com/portal>

搜索机器人原理及应用,点击进入,在页面最下方点击“工业机器人基础知识”教学视频。



10. 课程团队成员和课程内容政治审查意见

(申报课程高校党委负责对本校课程团队成员以及申报课程的内容进行政审,出具政审意见并加盖党委印章;团队成员涉及多校时,各校党委分别对本校人员出具意见;非高校成员由其所在单位党组织出具意见。团队成员政审意见内容包括政治表现、是否存在违法违纪记录、师德师风、学术不端、五年内是否出现过重大教学事故等问题;课程内容审查包括价值取向是否正确,对于我国政治制度以及党的理论、路线、方针、政策等理解和表述是否准确无误,对于国家主权、领土表述及标注是否准确,等等。)

11. 课程内容学术性评价意见

[由学校学术性组织(校教指委或学术委员会等),或相关部门组织的相应学科专业领域专家(不少于 3 名)组成的学术审查小组,经一定程序评价后出具。须由学术性组织盖章或学术审查小组全部专家签字。无统一格式要求。]

12. 其他材料,不超过 2 份(选择性提供)

附件 12. 教材《工业机器人》、9787568053891、韩建海、华中科技大学出版社,封面及版权页

以上材料均可能在网公开,请严格审查,确保不违反有关法律及保密规定。

附件目录

1. 附件 2 教学设计样例说明
2. 附件 3 最近一学期的教学日历
3. 附件 4 最近一学期的测验、考试（考核）及答案（成果等）
4. 附件 5 最近两学期的学生成绩分布统计
5. 附件 6 最近一学期课程教案《机器人原理及应用》教案
6. 附件 7 最近一学期学生评教结果统计
7. 附件 8 最近一次学校对课堂教学评价
8. 附件 10 学校政治审查意见
9. 附件 11 课程内容学术性评价意见
10. 附件 12 教材封面及版权页

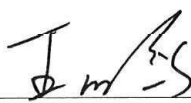


西安航空学院

Xi'an Aeronautical University

西安航空学院

线下一流课程教学设计方案

课程名称	机器人原理及应用
主讲教师	王鹏
职 称	副教授
所在单位	机械工程学院
课程负责人 人签字:	

二〇二一年四月

《工业机器人基础知识》教学设计方案

(一) 课程的一般信息 (课程名称、课程类型、教学对象、教具准备、主讲教师、参赛学院);

1.课程名称：机器人原理及应用

本课程是机器人工程专业的专业核心课。本课程的目的主要讲解工业机器人的基础理论，主要涉及有工业机器人的构型、运动学方程、动力学、关键功能部件、智能感知技术等内容。通过该课程的学习，满足学生了解有关工业机器人及概念及基本工作原理，具备工业机器人运动学分析的方法以及轨迹规划的基本能力，能够进行工业机器人的主要关键功能部件和智能感知技术的选型和应用。

2.课程类型：专业教育课

前导课程为工程制图、互换性与技术测量、理论力学、机械原理，后续课程为工业机器人结构设计、工业机器人编程技术。

3.教学对象：机器人工程专业三年级学生

该年级为本科三年级学生，已经完成了前导基础课程的学习，本课程安排在学生的第五个学期学习。

4.教具准备：雨课堂、PPT、图片、多媒体声像视频、动画，工程实物。

5.主讲教师：王鹏

硕士，副教授，毕业于西安工业大学机械设计及理论专业，陕西省机械工程学会机械设计分会理事。2009年在西安航空学院参加工作，曾任机械工程学院辅导员、机械基础教研室主任、机器人工程教研室主任。近五年主讲本科课程包括：《机械设计基础》、《机械原理》、《工业机器人

原理及应用》等主干课程的理论课教学任务。2014 年获校级教学竞赛一等奖，2017 年获西安航空学院青年教师教学质量优秀奖，2019 年获西安航空学院教学质量优秀奖，主编《机械基础综合实验教程》校内实验指导书一部，作为负责人获批 1 项校级教学成果奖二等奖；完成质量工程项目《机械设计基础》核心课程建设；参与 2018 年度陕西省创新创业课程《机械创新设计》建设项目。负责省教育厅项目 1 项，参与省教育厅科学研究课题 2 项，省科技厅项目 1 项；以第一作者公开发表核心论文 10 余篇，教改论文 1 篇。

（三）教学目标设计；

结合学情分析，本次课程教学目标分别从知识目标、能力目标、情感目标和品质目标三个方面展开。

1. 知识目标：

掌握工业机器人的基本知识与术语

2. 能力目标

（1）培养学生将已学工程基础知识应用于描述实际工程对象的能力；

（2）培养学生查阅相关技术资料的能力。

3. 核心素养目标：

素质目标：

（1）增强学生对制造业发展的民族自信心和自豪感；

（2）培养学生对机器人工程专业的热爱。

（四）教学重难点及处理；

教学重点：工业机器人主要参数。

以校企合作企业广州瑞松北斗汽车装备有限公司为广汽乘用车宜昌工厂汽车底板焊装产线为例，案例 PPT 如图 1 所示，突出本节课教学内容在工程实际应用中的重要性。

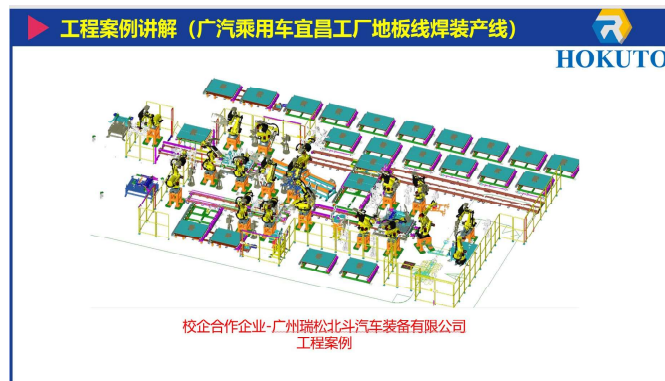


图 1 广汽乘用车宜昌工厂汽车底板焊装产线

通过底板侧围焊装产线设计，着重让学生理解工业机器人重复定位精度、运动空间、额定载荷、节拍四个参数在工业机器人实际应用中的重要性。同时通过工件的工艺分析、layout 设计强化学生对本专业培养目标的认识。

教学难点：定位精度和重复定位精度。

课前学生在机器人创新实验室进行开放实验，实验教师现场教学，利用实验设备，让学生初步了解工业机器人的基本组成，工业机器人本体的各部分结构，工业机器人的关节，工业机器人的各类末端执行器，讲解工业机器人示教器如图 2 所示。



图 2 讲解工业机器人示教器

结合江苏汇博智能装配生产线，通过实验教师讲解，增强学生对工业机器人的理性认识，实验教学活动的照片如图 3 所示。



图 3 讲解工业机器人在汇博智能装配生产线的应用

结合灵秀智能搬运生产线，主要讲解工业机器人在智能加工生产线中，要实现零件的上下料则需要对末端执行器的位姿提出精度的要求，尤其是重复定位精度，如图 4 所示。

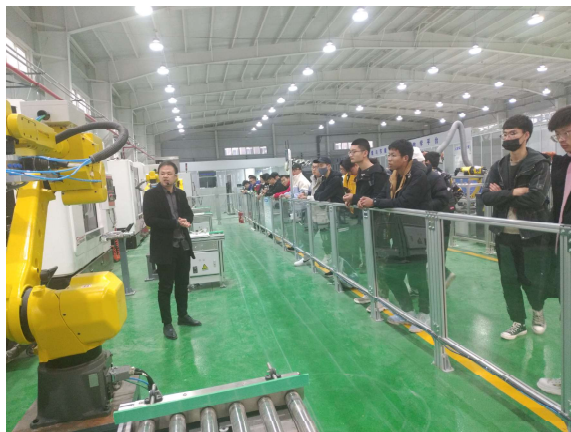


图 4 讲解灵秀智能搬运能生产线中机器人搬运精度

通过开放实验对工程实物的案例讲解，学生对定位精度和重复定位精度有了感性认识；通过课堂多媒体教学结

合教师手势语，让学生明确定位精度和重复定位精度的区别，课堂教学如图 5 所示，PPT 课件如图 6 所示。



图 5 课堂中工程实物教学



图 6 难点教学 PPT

(五) 教学媒体与资源选择；

根据课程内容和要求，将 PPT 课件和工业案例视频、Flash 动画相融合，通过雨课堂学习平台等实时互动，掌握学生学习动态，利用图、文、声、像、影等特殊效果引起学生的学习兴趣，如图 7，8 所示。



图 7 工业案例视频课堂教学

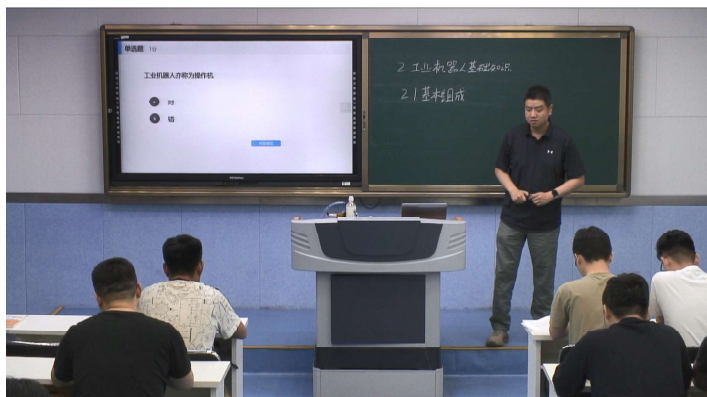


图 8 雨课堂实时互动

（六）课程思政元素体现及切入点；

通过习总书记的讲话，“机器人革命”有望成为“第三次工业革命”；机器人是“制造业皇冠顶端的明珠”，两个思政元素的切入点，深度挖掘课程中蕴含的思政元素并将它们有机结合到课堂教学过程中。引入工业机器人在未来制造业中的重要地位，使学生对工业机器人在制造业中的地位有直观认识，课程思政教学如图 9 所示。



图 9 课程思政教学

(八) 教学过程设计 (包含信息化教学设计);

步骤	教学目标	教学意图	教学方法	教学手段	学生活动
引入 (任务项目) (5min)	<p>引入项目：通过上堂课工业机器人的产生、发展以及应用引入课程思政</p> <p>“机器人革命”有望成为“第三次工业革命”；机器人是“制造业皇冠顶端的明珠”，两个思政元素的切入点，将影响中国制造业变革；</p> <p>通过习总书记的讲话，引入工业机器人在未来制造业中的重要地位，使学生对工业机器人在制造业中的地位有直观认识。</p>	<p>1.通过课程思政引入工业机器人在未来制造业中的重要地位，使学生对工业机器人的地位有直观认识。</p> <p>2.结合办学定位，专业特色体现工业机器人主要参数在应用方面的体现</p>	<p>启发提问：</p> <p>结合本专业的培养目标，本章知识的重要性如何体现？</p>	<p>课件</p>	<p>个别回答</p>
	<p>1.工业机器人的组成：</p> <p>以 IRB120 工业机器人为例：</p> <p>说明工业机器人由 4 个部分组成，操作机，示教器、控制器与控制</p>				

<p>知识点讲解 基本组成 (8min)</p>	<p>系统。</p> <p>示教器：工业机器人的人机交互接口，机器人的绝大部分操作均可通过示教器来完成。后面专业选修课程会学习《人机交互上位机软件设计与编程》-labview。</p> <p>控制器与控制系统：</p> <p>用来控制工业机器人按规定要求动作，是机器人的关键和核心部分。</p> <p>操作机：又称机器人本体，是工业机器人的机械主体，是用来完成规定任务的执行机构。它主要由<u>机械臂、驱动装置、传动装置和内部传感器</u>等部分组成。</p> <p>操作机有一个细节位置：连接法兰。</p>	<p>展示工业产品说明书，说明控制器和控制系统是工业机器人的灵魂</p> <p>提问：连接法兰的作用</p> <p>视频：展示工业机器人的柔性工作</p>	<p>课堂讲授</p> <p>视频演示</p>	<p>课件</p> <p>视频动画</p>	<p>雨课堂作答</p>
<p>基本术语</p>	<p>2.2 基本术语</p> <p>引入《理论力学》刚体</p>				

<p>(5min)</p>	<p>的概念； 引入《大学物理》中自由度的概念； 以 PUMA560 工业机器人为例： 连杆的概念；关节的概念</p> <p>关节的分类：分为四类 结合《机械原理》运动副的分类。分为空间运动副和平面运动副；平面运动副里面分为高副和低副；低副里面有移动副、转动副和回转副</p> <p>关节实物图（导轨、滑动轴承，球铰链） 关节符号、末端执行器、基座</p>	<p>回顾《大学物理》《理论力学》中概念</p> <p>对比《机械原理》连杆和运动副的概念</p> <p>通过与前置课程的联系，旨在让学生能通过前置课程知识，来描述工业机器人的机械本体的组成。</p> <p>旨在让学生拓展工业机器人的认识</p>	<p>PPT 讲授</p> <p>PPT 讲授</p> <p>PPT 讲授</p>	<p>课件</p>	
<p>本术语</p>	<p>工业机器人的运动轴 机器人轴、工装轴、基</p>	<p>目的：用工业实物代替书本</p>			

<p>(5min)</p>	<p>座轴。 TCP 工具中心点</p> <p>工业机器人的坐标系 关节坐标系、大地坐标系、基坐标系，工具坐标系</p>	<p>中枯燥的图片，加深学生对运动轴和工具中心点的理解，为后续学习打下基础</p> <p>目的：通过教师手势教学，理解坐标系建立的方式；通过工作站图片，让学生更清楚掌握各个坐标系在实际工程中的意义，为后续运动学分析学习打下基础。</p>	<p>多媒体工业机器人工作站图片、以及末端执行器实物讲授</p>	<p>课件末端执行器实物</p>	
	<p>展示 ABB_IRB120 工业机器人技术文件引出后</p>	<p>目的：体现技术参数，对于</p>			

<p>基本参数 (10min)</p>	<p>面所学习主要参数；</p> <p>自由度</p> <p>额定负载、载荷图 ABB-IRB120 的性能参数 强调节拍的概念；</p> <p>分辨率：包括系统分辨率和编程分辨率；</p>	<p>工业机器人选型应用的重要性，同时培养学生查阅相关资料的能力</p> <p>目的：结合工程实际用语，几个关节就应当有几个轴，轴的数目就表示该机器人就有几个自由度。</p> <p>目的：学生通过了解性能参数，日后毕业设计过程中进行工业机器人的轨迹规划以及节拍设置，进而对工业机器人及生产线做出经济性评价。</p>	<p>工程技术文件教学</p>	<p>工程技术文件教学课件</p>	
-------------------------	---	---	-----------------	-------------------	--

	<p>精度：又称绝对精度，是指机器人的末端执行器实际到达位置与目标位置之间的差距。</p> <p>重复精度：指在相同的运动位置命令下，机器人连续若干次运动轨迹之间的误差度量或指在相同的运动位置命令下，机器人重复定位其末端执行器于同一目标位置的能力，以实际位置值的分散程度来表示。</p> <p>小结：工业机器人具有定位精度低，重复定位精度高的特点</p> <p>工作空间：又称工作范围、工作行程，是指工业机器人作业时，手腕参考中心（即手腕旋转中心，P点）所能到达的空间区域，不包括手部本身所能达到的区域，常用图形表示。</p> <p>工作空间表示方法 了解工业机器人工</p>	<p>目的：通过教师手势教学和工业实际教学更深层次理解主要参数</p> <p>目的：通过教师手势教学和</p>	<p>末端执行器实物教学</p> <p>讨论案例</p>		<p>雨课堂作答、对于答案进行讨论</p> <p>参与讨论</p>
--	--	---	------------------------------	--	-----------------------------------

	作空间有什么目的？	工业实际教学 更深层次理解 主要参数	教学		
案例 解析 (10min)	以校企合作企业广州瑞松北斗汽车装备有限公司为广汽乘用车宜昌工厂汽车底板焊装产线为例。 工件工艺分析； 时序性分析； Layout 分析； 虚拟制造仿真分析； 目的： 1.验证工业机器人重复定位精度 2.工业机器人运动空间 3.工业机器人额定载荷 4.工业机器人节拍是否满足要求	目的： 使学生掌握工业机器人参数在实际生产中的重要地位	工程 案例 多媒体 教学	课件	参与 讨论
课堂 总结 (2min)	1.总结工业机器人的基本组成、基本术语、主要参数； 2.鼓励同学们利用网络广泛搜集工业机器人视频 3.布置后可讨论习题，提	让学生通过课堂所学知识利用网络查询相关资料，进一步加深对本章知识的理解和	讲授		

	醒下一节课的预习内容。	应用。			
--	-------------	-----	--	--	--

(九) 课件或板书设计；
课件首页，如图 10 所示。



图 10 课件首页

板书设计：

2. 工业机器人基本知识

2.1 工业机器人基本组成

本体（操作机）、示教器、控制器与控制系统

2.2 基本术语

刚体、连杆、关节、工业机器人运动简图

轴、坐标系

2.3 基本参数

自由度、额定负载、最大工作速度、节拍、精度、重复精度、分辨率、机械原点、工作空间

拓展：ABB_IRB120 工业机器人案例

(十) 教学评价与反思等。

教学评价：本节课在整个讲课过程中穿插使用了提问法、观察法、演示法等多种教学方法。通过与学生交流互动，让学生感到轻松的学习氛围，激发学生的思维活动；

培养学生的独立思考能力和语言表达能力；唤起和保持学生的注意力和兴趣。采用机构动画演示的方式，让学生通过观察，发现问题所在，并引导其独立思考解决问题的方法。本节课采用启发式和主动参与式教学策略，并和学生面对面互动，引导学生发现问题，分析问题并解决问题。

教学反思：学生对于工业机器人基本知识通常是“了解容易，应用难”，主要原因在于学生从理论知识到实际应用之间还存在一定差距，尤其是在学习了工业机器人的基本知识后实际选型时遇到困难，在课堂上通过布置拓展任务，能够很好地提升学生的课外能力，因此，在教学时还需要对整个过程中的各个环节及时完善，及时发现学生的“不懂”并及时调整教学设计，并且对教学效果及时跟踪调查才能更好地解决此类问题。

国家级一流本科课程申报课程教学日历 (2020)



课程名称: 机器人原理及应用

课程负责人: 王鹏

序号	日期	周次	讲次	学时(分钟)	教学内容(要点)	授课地点	学生人数	教学形式
1	2月25日	1	1	90	了解工业机器人; 能够正确对机器人以及工业机器人进行分类; 掌握工业机器人的定义和特点;	线上授课	66	理论
2	2月27日	1	2	90	了解工业机器人的发展以及在现代制造业中的应用	线上授课	66	理论
3	3月3日	2	3	90	掌握工业机器人的基本组成, 包括操作机、示教器、控制器和控制系统; 以及工业机器人中常用专业术语	线上授课	66	理论
4	3月5日	2	4	90	掌握工业机器人的主要工作参数和基本运动原理	线上授课	66	理论
5	3月10日	3	5	90	掌握工业机器人的机械系统组成以及行走机构	线上授课	66	理论
6	3月12日	3	6	90	掌握工业机器人的基座、小臂、大臂以及腕部机械结构	线上授课	66	理论
7	3月17日	4	7	90	掌握工业机器人整体传动系统的工作原理	线上授课	66	理论
8	3月19日	4	8	90	掌握刚体、物体、工业机器人末端执行器的位姿描述	线上授课	66	理论
9	3月24日	5	9	90	掌握坐标齐次变换以及空间动坐标系的位姿表示; 坐标系的平移变换	线上授课	66	理论
10	3月26日	5	10	90	掌握空间坐标系的旋转变换和复合变换, 能够求解正变换和逆变换	线上授课	66	理论
11	4月2日	6	11	90	掌握工业机器人运动学与空间坐标系齐次坐标的含义; 掌握运动学分析的参数(连杆长度、连连杆扭角度、连杆偏距、连杆转角)	线上授课	66	理论
12	4月7日	6	12	90	能够通过D-H参数法建立工业机器人运动学坐标; 能够通过给出关节变量值, 求解手部在空间笛卡尔坐标下的位姿;	线上授课	66	理论
13	4月9日	7	13	90	能够通过已知手部所要到达的目标位姿, 求解所需的关节变量值;	线上授课	66	理论
14	4月14日	7	14	90	了解工业机器人的感知技术; 工业机器人传感器概述; 掌握工业机器人的内部传感器。	线上授课	66	理论

16	4月21日	8	16	90	了解工业机器人控制系统的组成；掌握工业机器人控制系统的基本结构和控制器	线上授课	66	理论
17	4月23日	9	17	90	能够通过机电控制工程知识和单关节伺服控制模型，分析工业机器人的关节轴控制原理；能够通过插补原理分析工业机器人作业形式的控制原理	线上授课	66	理论
18	4月28日	9	18	90	了解轨迹规划的方法、能够运用多项式，通过约束条件进行轨迹规划	线上授课	66	理论
19	4月30日	10	19	90	通过约束条件求解位移、速度和加速度，并分析随时间变化的图形，并用matlab在计算机上实现	线上授课	66	理论
20	5月5日	10	20	90	了解工业机器人操作基本安全规则、以及工业机器人在智能生产线上的应用	线上授课	66	理论
21	5月9日	11	21	45	以四轴码垛工业机器人为对象，描述四轴工业机器人的机械结构、工作原理及性能指标；绘制四轴工业机器人运动空间图。	西航-塔普联合智能制造创新实验室	66	实践
22	5月9日	11	22	45	能够描述机器人建立坐标系的意义以及机器人坐标系的类型；深入研究机器人机械结构，建立6自由度关节型机器人杆件坐标系，绘制机器人杆件坐标系图；制作D-H参数表；求解TCP点运动方程	西航-塔普联合智能制造创新实验室	66	实践
23	5月12日	12	23	45	能够描述四轴工业机器人控制系统的组成及各部分的作用并绘制四轴工作站电气接线图。	西航-塔普联合智能制造创新实验室	66	实践
24	5月14日	12	24	45	能够描述机器人示教编程的原理；绘制分拣码垛程序流程图；利用C语言编写示教运动仿真程序，尝试调试运行。	西航-塔普联合智能制造创新实验室	66	实践

说明：

1. 请按照最近已完成的一学期实际课程开设情况填写。
2. 推荐类别为“线下一流课程”、“线上线下混合式一流课程”、“社会实践一流课程”中的一种。
3. 日期须写清年月日，授课地点须填写具体地点（教室），如果是非集中的在线学习，填写“在线”即可。
4. 教学形式请填写：线上、课堂、理论、实践等。
5. 不得变动表格行、列的位置和布局，表格内容按照时间顺序依次填写，序号应连续且不重复。所有列的值请保持为“文本型”，包括日期。

2019~2020 学年第二学期期末考试

《机器人原理及应用》 试卷 A



题号	一	二	三	四	五	六	七	八	总分	总分人
得分										
阅卷人										

适用班级：机器人工程 181，机器人工程 182

得分	
----	--

一、选择题（每题 2 分，共 20 分）

- 下列哪种方式是工业机器人最常见的控制方式_____。
 - 示教再现
 - 智能控制
 - 程序控制
 - 伺服控制
- 机器人的精度主要依存于机械误差、控制算法误差与分辨率系统误差。一般说来_____。
 - 绝对定位精度高于重复定位精度
 - 重复定位精度高于绝对定位精度
 - 机械精度高于控制精度
 - 控制精度高于分辨率精度
- _____多用来夹持表面粗糙的毛坯或半成品。
 - 平面指面
 - 弧形指面
 - 齿形指面
 - 柔性指面
- 手爪的主要功能是抓住工件、握持工件和_____工件。

- 固定
 - 定位
 - 释放
 - 触摸
5. 夹钳式手部中使用较多的是_____。
- 弹簧型手部
 - 齿轮型手部
 - 平移型手部
 - 回转型手部
6. RRR 型手腕是_____自由度手腕。
- 1
 - 2
 - 3
 - 4
7. 传感器在标定过程中加载输出与卸载输出之间的不重合性称为_____。
- 线性度
 - 迟滞
 - 灵敏度
 - 分辨力
8. 在工业机器人中，测试_____时，可利用半导体的压电效应进行测量。
- 电压
 - 亮度
 - 力和力矩
 - 距离
9. _____就是按照集成单元化的思想，将一件件的物料按照一定的模式堆码成垛，以便使单元化的物垛实现物料的存储、搬运、装卸运输等物流活动。
- 物流机器人工作站
 - 码垛机器人工作站
 - 搬运机器人工作站
 - 装卸机器人工作站
10. 使用焊枪示放前，检查焊枪的均压装置是否良好，动作是否正常，同时对电极头的要求是_____。
- 更换新的电极头

西安航空学院课程考试试卷

- B. 使用磨损量对较大的电极头
- C. 使用磨损量对较小的电极头
- D. 新的或旧的部行

得分	
----	--

二、填空题（每空 1 分，共 10 分）

1. 选用工业机器人时，如果适用于搬运工况时，搬运负载应当考虑_____和_____的质量。
2. IP 防护等级是由两个数字所组成，第 1 个数字表示_____的等级。
3. 真空式吸盘机械手需要配备_____，气流负压式吸盘机械手需要配备_____。
4. 在 YASKAWA 工业机器人中谐波减速器特别适用于_____传动。
5. _____表示沿 k 轴移动距离 r ，并绕 k 轴转动 φ 角的综合齐次坐标变换。
6. 工业机器人控制系统的主要功能有：_____与运动控制功能。
7. 机器人触觉可分为_____、_____、压觉、滑觉和力觉五种。

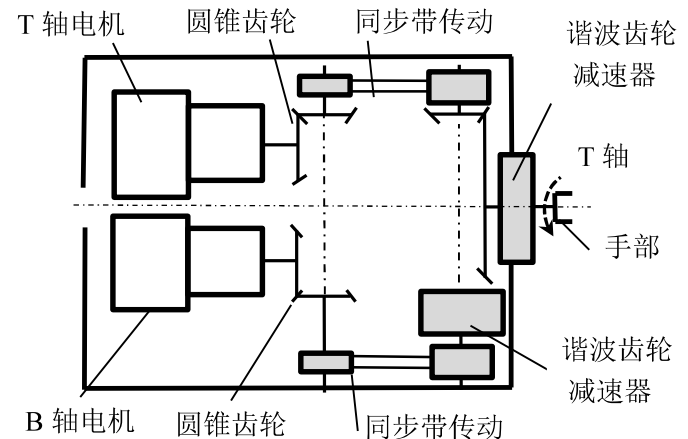
得分	
----	--

三、分析与简答题（共 4 小题，每题 5 分，共 20 分）

1. 请简要回答多关节坐标机器人有哪些特点（包含优缺点）？（本题 5 分）

2. 什么是工业机器人的控制分辨率？举例说明当编程分辨率与控制分辨率相等时，系统性能最高。（本题 5 分）

3. 如下图所示，工业机器人腕部传动机构运动简图，请回答腕部 T 关节实现哪个部位的什么运动？并简要说明 T 关节传动线路。（本题 5 分）



西安航空学院课程考试试卷

4. 在工业机器人的伺服控制中，直流伺服电动机经常采用 PWM 进行调速控制，PWM 是什么？调速控制原理是什么？（本题 5 分）

得分	
----	--

四、分析与计算（第 1 小题 6 分，第 2 小题 13 分，第 3 小题 23 分，第 4 小题 8 分，共 50 分）

1. B 点的坐标位于参考坐标系中 (2, 3, 4) 的位置，它的 n 轴与 x 轴夹角 30° ， o 轴与 y 轴夹角 30° ， a 轴与 z 轴平行。（本题 6 分）

(1)请作图说明 B 点所在坐标系相对于参考坐标系是一个什么姿态?(3 分)

(2)写出表示该坐标系的 3×4 位姿矩阵。(3 分)

2. 坐标系 {B} 绕 x 轴旋转 90° ，然后沿当前坐标系 a 轴平移 3，然后再绕 z 轴旋转 90° ，最后沿当前坐标系 o 轴平移 5。（本题 13 分）

(1) 写出描述该坐标系的运动方程。（4 分）

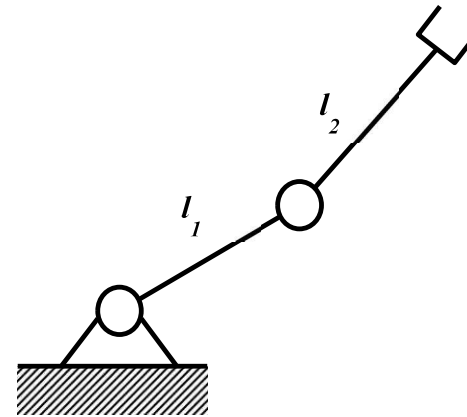
(2) 分别写出所有平移矩阵和旋转矩阵,并求坐标系中的点 P(1,5,4)相对于参考坐标系的最终位置。（9 分）

西安航空学院课程考试试卷

3. 如下图所示，2 轴平面机器人机构运动简图，两个连杆长度分别为 l_1 、 l_2 ，根据运动学 D-H 表示法试求：（本题 23 分）

（1）试按步骤求解该机器人的正运动学方程，用齐次坐标矩阵表示；**注意：坐标系可以在原图中直接建立。**（19 分）

（2）当 $\theta_1=90^\circ$ ， $\theta_2=45^\circ$ ； $l_1=30$ ， $l_2=50$ 时，试计算该机器人手部中心的位姿矩阵（4 分）。



西安航空学院课程考试试卷

4. 一台工业机器人某关节从 $\theta=30^\circ$ ，静止开始，在 2 秒钟时到达 $\theta=180^\circ$ 处且速度为零，试求（本题 8 分）

(1) 试用三次多项式对其运动进行规划。（5 分）

(2) 并画出位移、速度和加速度随时间变化的图形。（3 分）

西安航空学院课程考试答案及评分标准

2019~2020 学年第二学期期末考试

《机器人原理及应用》 试卷 A 答案及评分标准

一、选择题（每题 2 分，共 20 分）

1. A 2. B 3. C 4. C 5. D
6. C 7. B 8. C 9. B 10. A

二、填空题（每空 1 分，共 10 分）

- 零件，执行器（或手爪）
- 电器防尘、防止外物侵入（答出防尘或者防止外物侵入都可得分）
- 真空控制系统，空压机
- 次轴
- 旋量或（Screw (k, r, φ) ）
- 示教再现功能
- 接近觉、接触觉

三、分析简答题（共 4 小题，每题 5 分，共 20 分）

1. 答：优点：结构最紧凑，灵活性大，占地面积最小，工作空间最大，能与其他机器人协调工作，避障性好(3 分)

缺点：位置精度较低，有平衡问题，控制存在耦合，设计与控制比较复杂（2 分）

2. 答：控制分辨率是位置反馈回路能够检测到的最小位移量。（2 分）

举例：若每周（转）1 000 个脉冲的增量式编码盘与电动机同轴安装，则电动机每旋转 0.36° ($360^\circ, 1000 \text{ r/min}$)，编码盘就发出一个脉冲， 0.36° 以下的角度变化无法检测，则该系统的控制分辨率为 0.36° 。（3 分）显然，当编程分辨率与控制分辨率相等时，系统性能最高。

3. 答：腕部 T 关节控制工业机器人手部姿态,主要控制手部的旋转(2 分); T 关节的

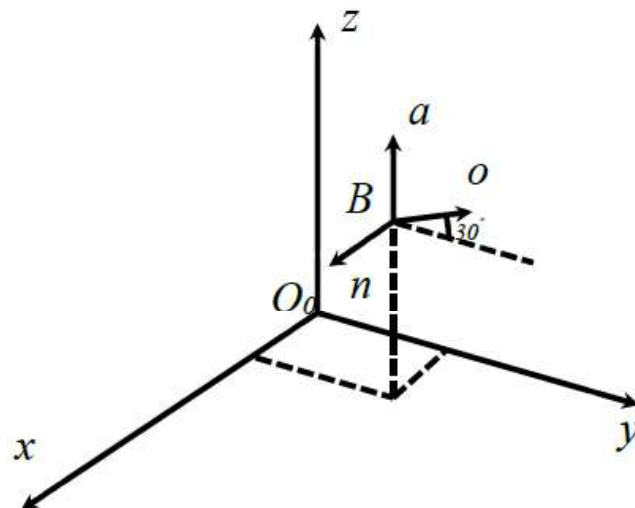
传动线路图由 T 轴电机开始,经过一对圆锥齿轮啮合,经过同步带传动在经过一对圆锥齿轮啮合,将运动传递给谐波齿轮减速器,最后通过减速器输出传递给 T 关节。（3 分）

4. 答：PWM 称为脉冲宽度调制。（2 分）是利用大功率晶体管的开关作用，将恒定的直流电源电压斩成一定频率的方波电压，并加在直流电动机的电枢上，通过对方波脉冲宽度的控制，改变电枢的平均电压控制电动机转速的一种方式。（3 分）

四、分析与计算（第 1 小题 6 分，第 2 小题 13 分，第 3 小题 23 分，第 4 小题 8 分，共 50 分）

1. 解：解：B 坐标系绕 Z 轴旋转 30 度

因此，使用位姿矩阵式包含绕 Z 轴旋转矩阵+B 点的位置矢量。（含作图 3 分）



西安航空学院课程考试答案及评分标准

$${}^A_B R = (\text{Rot}(z, 30), P) = \begin{pmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} & 0 & 2 \\ \frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 0 & 3 \\ 0 & 0 & 1 & 4 \end{pmatrix} \quad (\text{表达式 3 分})$$

2.解: (1)相应地左乘或右乘每个运动矩阵,得到

$${}^U T_B = \text{Rot}(z, 90^\circ) \times \text{Rot}(x, 90^\circ) \times \text{Trans}(0, 0, 3) \times \text{Trans}(0, 5, 0) \quad (4 \text{ 分})$$

(2) 平移矩阵和旋转矩阵如下:

$$\text{旋转矩阵: } \text{Rot}(z, 90^\circ) = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2 \text{ 分})$$

$$\text{旋转矩阵: } \text{Rot}(x, 90^\circ) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2 \text{ 分})$$

$$\text{平移矩阵: } \text{Trans}(0, 0, 3) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2 \text{ 分})$$

$$\text{平移矩阵: } \text{Trans}(0, 5, 0) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 5 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2 \text{ 分})$$

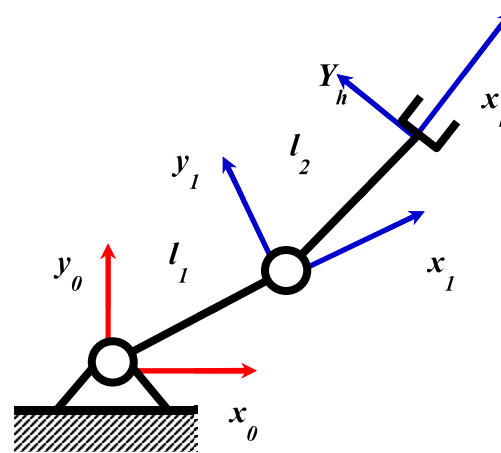
点 P(1,5,4)相对于参考坐标系的最终位置

$${}^U p = {}^U T_B \times {}^B P = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 5 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 5 \\ 0 & 0 & 1 & 4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 7 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 10 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

P 点的位置坐标 (7, 1, 10) (1 分)

3. (1) 解: 1) 建立坐标系 (每个关节坐标系 2 分, 共 6 分)

- a、机座坐标系 {0}
- b、杆件坐标系 {i}
- c、手部坐标系 {h}



2) 列出 D-H 参数表 (每次变换参数 3 分, 共 6 分)

西安航空学院课程考试答案及评分标准

i	d_i	θ_i	a_i	α_i
1	0	θ_1	l_1	0
2	0	θ_2	l_2	0

3) 相邻杆件位姿齐次坐标变换矩阵

$$M_{01} = Rot(z, \theta_1) Trans(l_1, 0, 0)$$

$$= \begin{pmatrix} c\theta_1 & -s\theta_1 & 0 & 0 \\ s\theta_1 & c\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & l_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \dots\dots\dots (2 \text{分})$$

$$= \begin{pmatrix} c\theta_1 & -s\theta_1 & 0 & l_1 c\theta_1 \\ s\theta_1 & c\theta_1 & 0 & l_1 s\theta_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$M_{1h} = Rot(z, \theta_2) Trans(l_2, 0, 0)$$

$$= \begin{pmatrix} c\theta_2 & -s\theta_2 & 0 & 0 \\ s\theta_2 & c\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & l_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \dots\dots\dots (2 \text{分})$$

$$= \begin{pmatrix} c\theta_2 & -s\theta_2 & 0 & l_2 c\theta_2 \\ s\theta_2 & c\theta_2 & 0 & l_2 s\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

4) 机器人的正运动学方程

将相邻杆件位姿矩阵依次相乘，则有：

$$M_{0h} = M_{01} M_{1h} = \begin{pmatrix} c\theta_1 & -s\theta_1 & 0 & l_1 c\theta_1 \\ s\theta_1 & c\theta_1 & 0 & l_1 s\theta_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c\theta_2 & -s\theta_2 & 0 & l_2 c\theta_2 \\ s\theta_2 & c\theta_2 & 0 & l_2 s\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} c\theta_{12} & -s\theta_{12} & 0 & l_1 c\theta_1 + l_2 c\theta_{12} \\ s\theta_{12} & c\theta_{12} & 0 & l_1 s\theta_1 + l_2 s\theta_{12} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

..... (3分)

(2) 解：当 $\theta_1=90^\circ, \theta_2=45^\circ; l_1=30, l_2=50$ 时

$$M_{0h} = \begin{pmatrix} c\theta_{12} & -s\theta_{12} & 0 & l_1 c\theta_1 + l_2 c\theta_{12} \\ s\theta_{12} & c\theta_{12} & 0 & l_1 s\theta_1 + l_2 s\theta_{12} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} & 0 & -25\sqrt{2} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} & 0 & 30+25\sqrt{2} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \dots\dots\dots(4 \text{分})$$

4. 解：设关节运动的三次多项式为：

$$\theta(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3$$

添加四个约束条件，既四个约束方程

$$\begin{cases} a_1 = 0 \\ a_1 + 4a_2 + 12a_3 = 0 \end{cases} \quad \text{速度约束方程 (2分)}$$

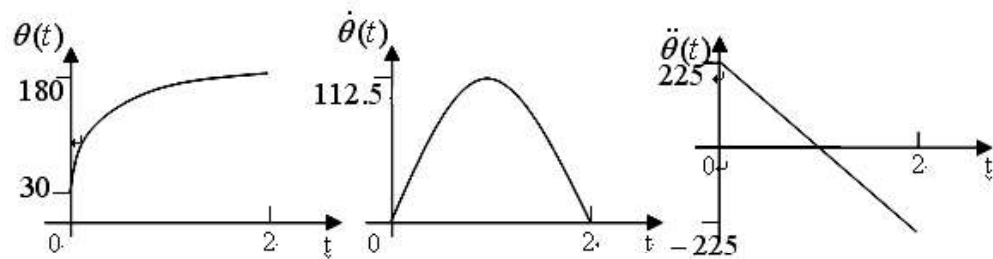
$$\begin{cases} a_0 = 30 \\ a_0 + 2a_1 + 4a_2 + 8a_3 = 180 \end{cases} \quad \text{加速度约束方程 (2分)}$$

得： $a_0=30, a_1=0, a_2=112.5, a_3=-37.5$

$$\theta(t) = 30 + 112.5t^2 - 37.5t^3 \quad (1 \text{分})$$

西安航空学院课程考试答案及评分标准

由 $\dot{\theta}(t) = 225t - 112.5t^2$ 可得，位移、速度以及加速度曲线
 $\ddot{\theta}(t) = 225 - 225t$



(作图 3 分)

西安航空学院课程考试试卷

2019~2020 学年第二学期期末考试

《机器人原理及应用》 试卷 B



题号	一	二	三	四	五	六	七	八	总分	总分人
得分										
阅卷人										

适用班级：机器人工程 181，机器人工程 182

得分	
----	--

一、选择题（每题 2 分，共 20 分）

1. 当代工业机器人起源于_____个分支。

- A. 计算机与数控机床 B. 遥控操作机与计算机
C. 遥控操作机与数控机床 D. 计算机与人工智能

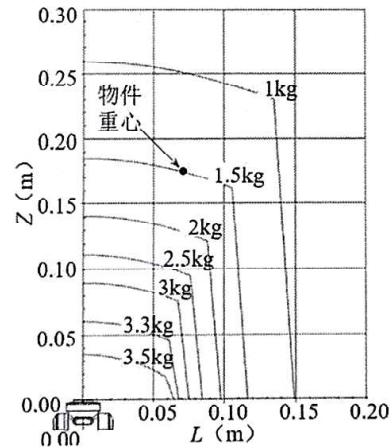
2. 如右图所示，工业机器人最大负载载荷是_____。

- A. 3kg B. 3.5kg
C. 1kg D. 2.5kg

3. _____多用来夹持轻金属薄壁零件。

- A. 平面指面 B. 弧形指面
C. 齿形指面 D. 柔性指面

4. 平移型传动机构主要用于加持_____工件。



第 2 题图

- A. 圆柱形 B. 球形
C. 平面形 D. 不规则形
5. 真空吸盘要求工件表面_____、干燥清洁，同时气密性好。
- A. 粗糙 B. 凹凸不平
C. 平缓突起 D. 平整光滑
6. 工业机器人常见电气驱动中，经常可能使用步进电机、直流伺服电机、交流伺服电机，他们的英文字母表示依次为_____。
- A. SM、DM、AC B. SM、DC、AC
C. SM、AC、DC D. SC、AC、DC
7. _____指传感器在稳态工作情况下输出量变化 Δy 对输入量变化 Δx 的比值。它是输出—输入特性曲线的斜率。
- A. 线性度 B. 迟滞
C. 灵敏度 D. 分辨力
8. 工业机器人中应用电容式传感器测量微米级的距离，应该采用改变_____的方式。
- A. 极板间物质介电常数 B. 极板面积
C. 极板距离 D. 电压
9. 在弧焊工业机器人工作过程中，最为重要的指标是速度的稳定性和_____的精度。
- A. 位置 B. 姿态
C. 位姿 D. 轨迹
10. 在焊接机器人智能生产线中，_____的作用是将焊工件旋转(平移)到最佳的焊

西安航空学院课程考试试卷

接位置。

- A. 送丝机 B. 防碰撞传感器
- C. 焊枪 D. 变位机

得分	
----	--

二、填空题（每空 1 分，共 10 分）

1. 如果选择工业机器人的应用，需要一定的力矩去完成时，则需要检各轴的_____是否满足要求。
2. IP 防护等级是由两个数字所组成，第 2 个数字表示_____。
3. 气动工业机器人手中，气压传动回路中常用到的气动三联件由_____、_____、_____组成。
4. 若齐次变换矩阵为： $M_{ij} = \begin{pmatrix} R_{ij} & \vec{p}_{ij} \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ ，那么 $M_{ij}^{-1} =$ _____。
5. 工业机器人的控制方式有_____、_____、力（力矩）控制、示教再现控制。
6. 工业机器人的视觉系统可以分为_____、_____、和图像输出等几个部分。

得分	
----	--

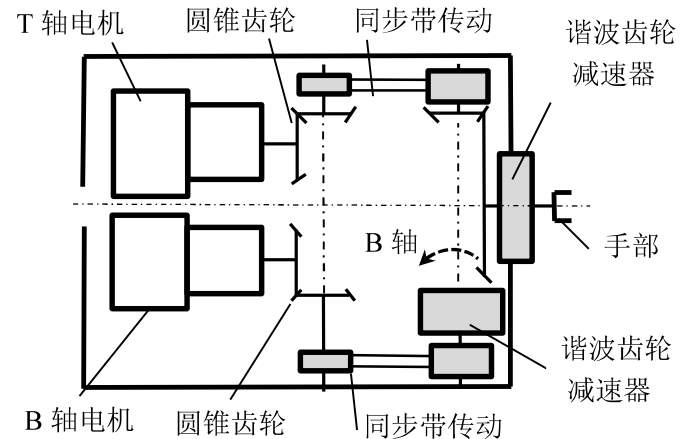
三、分析简答题（共 4 小题，每题 5 分，共 20 分）

1. 请简要回答，并联机器人有哪些特点（包含优缺点）？（本题 5 分）

2. 如下图所示，ABB IRB1600 型 六轴工业机器人，请绘制各连杆和关节的机构运动简图？（本题 5 分）

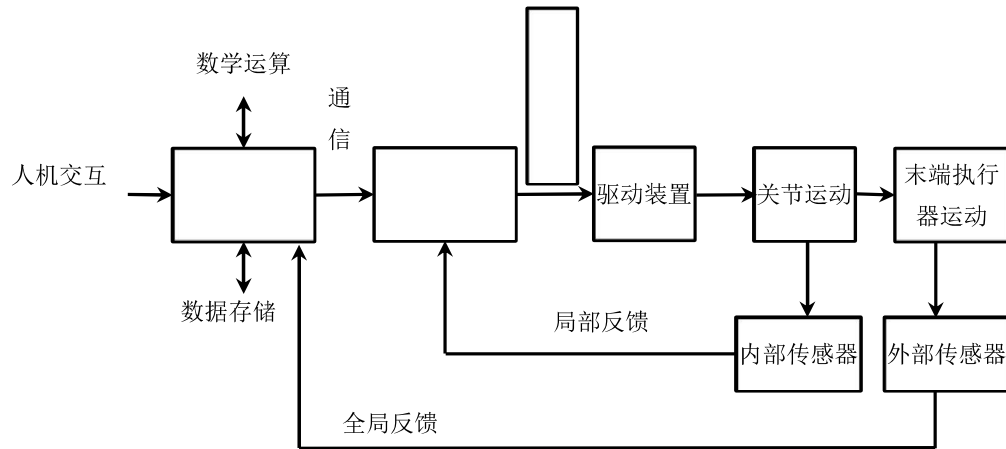


3. 如下图所示，为工业机器人腕部传动机构运动简图，请回答腕部 B 关节实现哪个部位的什么运动？并简要说明 B 关节传动线路。（本题 5 分）



西安航空学院课程考试试卷

4. 下图为一个工业机器人单片机控制系统原理框图，请说明哪种形式工业机器人控制系统，并补全该运动控制系统框图？（本题 5 分）



得分	
----	--

四、分析与计算（第 1 小题 6 分，第 2 小题 13 分，第 3 小题 23 分，第 4 小题 8 分，共 50 分）

1. B 点的坐标位于参考坐标系中 (5, 6, 7) 的位置，它的 n 轴与 x 轴夹角 60° ， o 轴与 y 轴平行， a 轴与 z 轴夹角 60° 。（本题 6 分）

(1)请作图并说明 B 点所在坐标系相对于参考坐标系是一个什么姿态?(3 分)

(2)写出表示该坐标系的 3×4 位姿矩阵。(3 分)

2. 坐标系 {B} 绕 z 轴旋转 90° ，然后沿当前坐标系 o 轴平移 -5，然后再绕 x 轴旋转 90° ，最后沿当前坐标系 a 轴平移 -8。（本题 13 分）

(1)写出描述该坐标系的运动方程。(4 分)

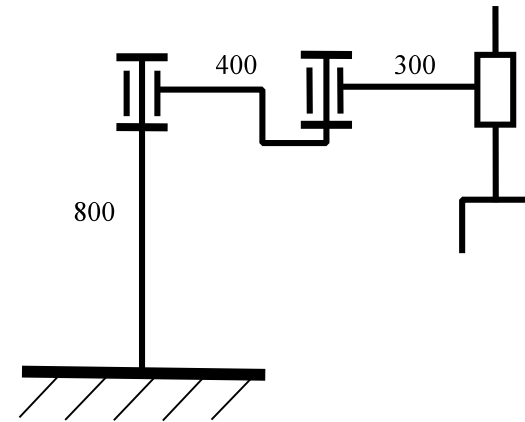
(2)分别写出所有平移矩阵和旋转矩阵,并求坐标系中的点 P(4,3,5)相对于参考坐标系的最终位置。(9 分)

西安航空学院课程考试试卷

3. 如图所示，已知三自由度机器人。若机器人机座高为 800，杆件 1、2 的长度分别为 400、300，试求：(本题 23 分)

1) 试按步骤求解该机器人的正运动学方程，用齐次坐标矩阵表示；**注意：坐标系可以在原图中直接建立。**(19 分)

2) 若关节 1、2 的旋转角度分别为 45° 、 90° ，而关节 3 向下平移的距离为 300，试计算该机器人手部中心的位姿矩阵。(4 分)



西安航空学院课程考试试卷

4. 要求一个六轴机器人的第 1 关节从 0 秒到 3 秒，由初始角 50° 移动到终止角 80° ，假设机器人从静止开始运动，最终停在目标点上。试求：（本题 8 分）

（1）用三次多项式完成关节空间轨迹规划，试求三次多项式轨迹方程。（5 分）

（2）并计算第 1、2、3 秒时关节角度、速度和加速度。（3 分）

西安航空学院课程考试答案及评分标准

2019~2020 学年第二学期期末考试

《机器人原理及应用》 试卷 B 答案及评分标准

一、选择题（每题 2 分，共 20 分）

1.C 2.B 3.D 4.C 5.D

6.B 7.C 8.C 9.D 10.D

二、填空题（每空 1 分，共 10 分）

1.允许力矩

2.电器防湿气、防水侵入的密闭程度

3.过滤器，减压阀，油雾器

4.
$$\begin{pmatrix} R_{ij} & -R_{ij}^T \cdot \vec{P}_{ij} \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

5.点位轨迹控制、连续轨迹控制

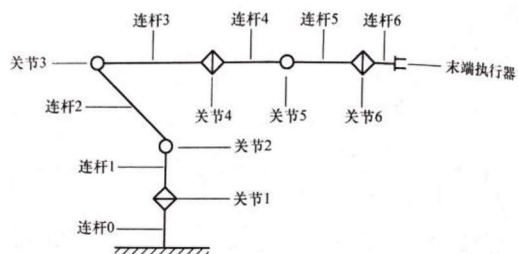
6.图像输入、图像处理

三、分析简答题（共 4 小题，每题 5 分，共 20 分）

1 答：优点：刚性好，结构稳定，承载能力高，运动精度高（3 分）

缺点：活动空间小。（2 分）

2.答：



只要存在关节符号错误、关节数目或者连杆数目不对均不得分。

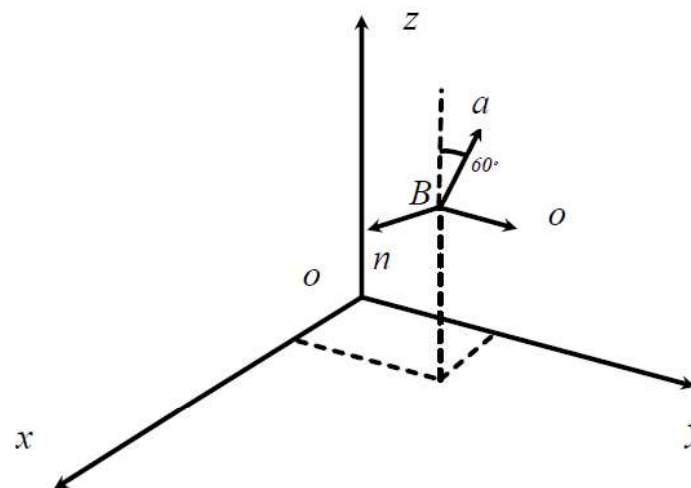
3.答：腕部 B 关节控制工业机器人手部姿态,主要控制手部的俯仰(2 分);B 关节的传动线路图由 B 轴电机开始,经过一对圆锥齿轮啮合,经过同步带传动,将运动传递给谐波齿轮减速器,最后通过减速器输出传递给 B 关节。（3 分）

4. 答：分布式控制系统（2 分） 伺服驱动（1 分）一级（上位机）微型计算机（1 分）二级（下位机）单片机运动控制器（2 分）

四、分析与计算（第 1 小题 6 分，第 2 小题 13 分，第 3 小题 23 分，第 4 小题 8 分，共 50 分）

1.解：B 坐标系统 Y 轴旋转 60 度。

因此，使用位姿矩阵式包含绕 Y 轴旋转矩阵+B 点的位置矢量。（含作图 3 分）



西安航空学院课程考试答案及评分标准

$${}^A_B R = (\text{Rot}(y, 60), P) = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} & 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & 5 \\ 0 & 1 & 0 & 6 \\ -\frac{\sqrt{3}}{2} & 0 & \frac{1}{2} & 7 \end{pmatrix} \quad (\text{表达式 3 分})$$

2.解: (1)相应地左乘或右乘每个运动矩阵,得到

$${}^U T_B = \text{Rot}(x, 90^\circ) \times \text{Rot}(z, 90^\circ) \times \text{Trans}(0, -5, 0) \times \text{Trans}(0, 0, -8) \quad (4 \text{ 分})$$

(2) 平移矩阵和旋转矩阵如下:

$$\text{旋转矩阵: } \text{Rot}(z, 90^\circ) = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2 \text{ 分})$$

$$\text{旋转矩阵: } \text{Rot}(x, 90^\circ) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2 \text{ 分})$$

$$\text{平移矩阵: } \text{Trans}(0, 0, -8) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -8 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2 \text{ 分})$$

$$\text{平移矩阵: } \text{Trans}(0, -5, 0) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -5 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2 \text{ 分})$$

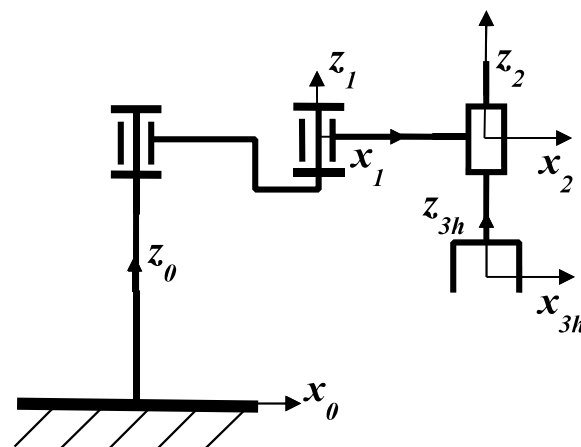
点 P(1,5,4)相对于参考坐标系的最终位置

$${}^u p = {}^U T_B \times {}^B P = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -5 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -8 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 4 \\ 0 & 1 & 0 & 3 \\ 0 & 0 & 1 & 5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & -1 & 3 \\ 1 & 0 & 0 & 4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

位置坐标 (2, 3, 4) (1 分)

3. (1) 解: 1) 建立坐标系 (每个关节坐标系 2 分, 共 8 分)



2) 列出 D-H 参数表 (每次变换参数 2 分, 共 6 分)

西安航空学院课程考试答案及评分标准

序号	θ_i	d_i	a_i	α_i
1	θ_1	800	400	0
2	θ_2	0	300	0
3	0	d_3	0	0

3) 相邻杆件位姿齐次坐标变换矩阵

$$M_{01} = Rot(z, \theta_1) Trans(400, 0, 800) = \begin{pmatrix} c\theta_1 & -s\theta_1 & 0 & 0 \\ s\theta_1 & c\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 400 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 800 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} c\theta_1 & -s\theta_1 & 0 & 400c\theta_1 \\ s\theta_1 & c\theta_1 & 0 & 400s\theta_1 \\ 0 & 0 & 1 & 800 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

.....(1分)

$$M_{12} = Rot(z, \theta_2) Trans(300, 0, 0) = \begin{pmatrix} c\theta_2 & -s\theta_2 & 0 & 0 \\ s\theta_2 & c\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 300 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} c\theta_2 & -s\theta_2 & 0 & 300c\theta_2 \\ s\theta_2 & c\theta_2 & 0 & 300s\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

..... (1分)

$$M_{23(h)} = Trans(0, 0, d_3) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \dots\dots\dots (1分)$$

4) 机器人的正运动学方程

将相邻杆件位姿矩阵依次相乘, 则有:

$$M_{03(h)} = M_{01} M_{12} M_{23(h)} = \begin{pmatrix} c\theta_{12} & -s\theta_{12} & 0 & 400c\theta_1 + 300c\theta_{12} \\ s\theta_{12} & c\theta_{12} & 0 & 400s\theta_1 + 300s\theta_{12} \\ 0 & 0 & 1 & 800 + d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \dots\dots\dots (2分)$$

(2) 解: $\theta_1=45^\circ$, 当 $\theta_2=90^\circ$, $d_3=-300$ 时

$$M_{03(h)} = \begin{pmatrix} -\frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} & 0 & 50\sqrt{2} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} & 0 & 350\sqrt{2} \\ 0 & 0 & 1 & 500 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \dots\dots\dots (4分)$$

4. 解: 设关节运动的三次多项式为:

$$\theta(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3$$

添加四个约束条件, 既四个约束方程

$$\begin{cases} a_0 = 50 \\ 3a_1 + 9a_2 + 27a_3 = 80 \end{cases} \quad \text{速度约束方程 (2分)}$$

$$\begin{cases} a_1 = 0 \\ a_1 + 6a_2 + 27a_3 = 0 \end{cases} \quad \text{加速度约束方程 (2分)}$$

西安航空学院课程考试答案及评分标准

得: $a_0=50, a_1=0, a_2=10, a_3=-\frac{20}{9}$

$$\theta(t) = 50 + 10t^2 - \frac{20}{9}t^3 \quad (1 \text{ 分})$$

由 $\dot{\theta}(t) = 20t - \frac{20}{3}t^2$ 可得, 第 1、2、3 秒时关节角度、速度和加速度。
 $\ddot{\theta}(t) = 20 - \frac{40}{3}t$

$$\text{可得} \begin{cases} \theta(1) = 57.7^\circ, \dot{\theta}(1) = 13.3^\circ / s, \ddot{\theta}(1) = 6.7^\circ / s^2 \\ \theta(2) = 72.2^\circ, \dot{\theta}(2) = 13.3^\circ / s, \ddot{\theta}(2) = -6.7^\circ / s^2 \\ \theta(3) = 80^\circ, \dot{\theta}(3) = 0^\circ / s, \ddot{\theta}(3) = -20^\circ / s^2 \end{cases} \quad (3 \text{ 分}) \text{ 不写单位不得分}$$

《机器人原理及应用》近两学期成绩统计

开课学期	课程名称	教师	开课单位	班级	实际人数	0-59分	60-69分	70-79分	80-89分	90-100分	最低分	最高分	卷面不及格人数	卷面不及格率(不及格人数/班级人数*100%)	总评成绩不及格人数	总评成绩不及格率(总评成绩不及格人数/班级人数*100%)
2018-2019-2	工业机器人原理及应用	王鹏	机械工程学院	机器人2101	32	9	9	10	3	1	25	91	9	28.10%	4	10.50%
	工业机器人原理及应用	王鹏	机械工程学院	机器人2102	33	2	4	10	12	5	50	97	2	6%	0	0%
2019-2020-2	工业机器人原理及应用	王鹏	机械工程学院	机器人181	32	1	6	11	11	3	54	96	1	3.10%	0	0%
	工业机器人原理及应用	王鹏	机械工程学院	机器人182	34	2	7	10	12	3	53	96	2	5.80%	0	0%

西安航空学院试卷及成绩分析表 (试卷类)

20 18 -20 19 学年第 二 学期 开课单位: 机械工程学院

课程性质: <input checked="" type="checkbox"/> 必修, <input type="checkbox"/> 选修		课程名称: 机器人原理及应用																				
任课教师: 王鹏		班级: 机器人 2102																				
考试时间: 2019.05.31 15:40-17:40																						
试卷来源: <input checked="" type="checkbox"/> 命题 <input type="checkbox"/> 题库 <input type="checkbox"/> 其他		卷别: <input type="checkbox"/> A <input checked="" type="checkbox"/> B			考核方式: <input checked="" type="checkbox"/> 闭卷 <input type="checkbox"/> 开卷 <input type="checkbox"/> 其它																	
卷面 质量 分析	考题要求	基本知识	理解分析	综合运用	合计																	
	分值	50	25	25	100																	
1、试卷出错: <input checked="" type="checkbox"/> 无 <input type="checkbox"/> 有: 原理性错误(图表、数据等) <u>0</u> 处, 一般性错误 <u>0</u> 处。																						
命题 质量 分析	<p>(1) 试题根据《机器人原理及应用》课程教学大纲的完全贴合, 试题内容涵盖了课堂教学大纲中各章内容。试题考核知识点包含八部分内容, 分布情况: 工业机器人概述 10%; 工业机器人的基本术语 10%; 工业机器人机械系统 20%; 工业机器人数学基础与运动学占 40%; 工业机器人控制系统与检测系统占 10%; 机器人轨迹规划占 5%; 工业机器人应用占 5%。所占比例符合课程教学课时分配比例要求。</p> <p>(2) 命题设计的合理性分析。主客观题比例 3: 2 体现学生知识掌握情况和分析工程问题的能力; 试题的主、客观题比例符合要求, 各种题型的分数选择题 20%, 填空题 20%, 简答题 20%, 分析与计算 40%, 分配合理, 主观题理解分析为主, 测试内容符合课程教学大纲课时分配比例要求。</p> <p>(3) 难易程度分析。试题难度、深度与教学大纲、教学要求、人才培养要求相符, 既考查了学生对知识的掌握程度, 又考核了学生实际应用、解决问题的能力。</p>																					
教学 效果 分析	成绩分数段	0~59	60~69	70~79	80~89	90~100	最高分	最低分	平均分	及格率												
	人数	2	4	10	12	5	97	50	77	94%												
	百分比	6%	12.1%	30.4%	36.4%	15.1%																
<table border="1" style="margin: 10px auto; border-collapse: collapse;"> <caption>成绩分布柱状图数据</caption> <thead> <tr> <th>成绩分数段</th> <th>人数</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0-59</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>60-69</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>70-79</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>80-89</td> <td>12</td> </tr> <tr> <td>90-100</td> <td>5</td> </tr> </tbody> </table> <p>(1) 成绩分析: 偏度值为-0.34, 学生课程成绩分布属于右偏分布, 偏度在-0.47-0.47 之间, 则可以认为分布靠右, 学生整体成绩偏高; 峰度-0.49, 参考范围-0.15-0.95, 成绩分布均匀存在一点点离散性;</p>											成绩分数段	人数	0-59	2	60-69	4	70-79	10	80-89	12	90-100	5
成绩分数段	人数																					
0-59	2																					
60-69	4																					
70-79	10																					
80-89	12																					
90-100	5																					

平均分 77, 平均分落在 75-80 之间, 平均分较高。
 标准差 8.33, 高校课程考试为目标参照型考试。正常的课程考试, 一般要求标准差在参考值范围之内, 参考值 5-12 之间。当标准差在合理范围内时, 表示学生的学习水平差距不大, 试卷的难度适中。

(2) 知识点得分及学生掌握情况分析

学生对于工业机器人基本知识掌握较好, 基本概念学习到位; 对重点问题: 工业机器人的运动学 D-H 坐标建立掌握较好, 对于涉及四个参数有较明确的理解; 对难点问题工业机器人位姿矩阵齐次坐标变换掌握较好。

本班学生数学基础较好, 矩阵运算结果得分率较高。

有 5 个知识点得分较低, 存在问题:

1. 学生对“工业机器人组成概念”的理解不到位, 错误答案都写成工业机器人的分类。
2. “工业机器人自由度”指独立运动坐标数目, 不包括末端执行器的运动。错误答案经常写成“坐标系数目”并且大多数学生不写不包括“末端执行器”。
3. 工业机器人传感器中“内部传感器”和“外部传感器”分辨不清楚。
4. 对传感器中“迟滞”和“灵敏度”的概念掌握较差。
5. 3×4 矩阵描述对动坐标系的位姿描述不清楚。

学风分析

1. 学生平时学习态度积极, 几乎没有旷课现象。
2. 上课认真听讲, 课后能按时交作业, 作业质量相对较好。
3. 学风基本正常。全部学生参加期末考试, 参加考试率 100%。
4. 本课程平时成绩包括四个部分: 平时考勤, 平时作业, 课内四次实验报告, 本学期将课堂笔记作为了平时成绩的一个考查内容, 这样有助于提高课堂教学质量。
5. 每周安排固定答疑时间, 答疑人数较少; 课堂内测试了一次线性代数基本知识, 反应学生矩阵运算能力较差。

工作中存在的问题及改进措施

通过试卷和成绩的分析, 个人认为试卷内容, 分值分配符合要求, 成绩分布正常, 及格率达 94%, 由于课时较少, 平时考核次数较少。

1. 教学过程中更强调运用多媒体教学, 便于理解工业机器人运动学原理。
2. 挤出时间复习线性代数矩阵运算知识, 以便提高学生工程数学的计算能力。

任课教师(签字): 王书芳

教研室主任(签字): 王书芳 2019 年 6 月 15 日

注: 表中使用的字符 , 选中的用 , 未选中的用 。红色的说明文字请删除。

西安航空学院试卷及成绩分析表 (试卷类)

20 18 -20 19 学年第 二 学期 开课单位: 机械工程学院

课程性质: <input checked="" type="checkbox"/> 必修, <input type="checkbox"/> 选修	课程名称: 机器人原理及应用
任课教师: 王鹏	班级: 机器人 2101
考试时间: 2019.05.31 15:40-17:40	

试卷来源: <input checked="" type="checkbox"/> 命题 <input type="checkbox"/> 题库 <input type="checkbox"/> 其它	卷别: <input type="checkbox"/> A <input checked="" type="checkbox"/> B	考核方式: <input checked="" type="checkbox"/> 闭卷 <input type="checkbox"/> 开卷 <input type="checkbox"/> 其它
--	--	--

卷面质量分析	考题要求	基本知识	理解分析	综合运用	合计
	分值	50	25	25	100

1、试卷出错: 无 有: 原理性错误(图表、数据等) 0 处, 一般性错误 0 处。

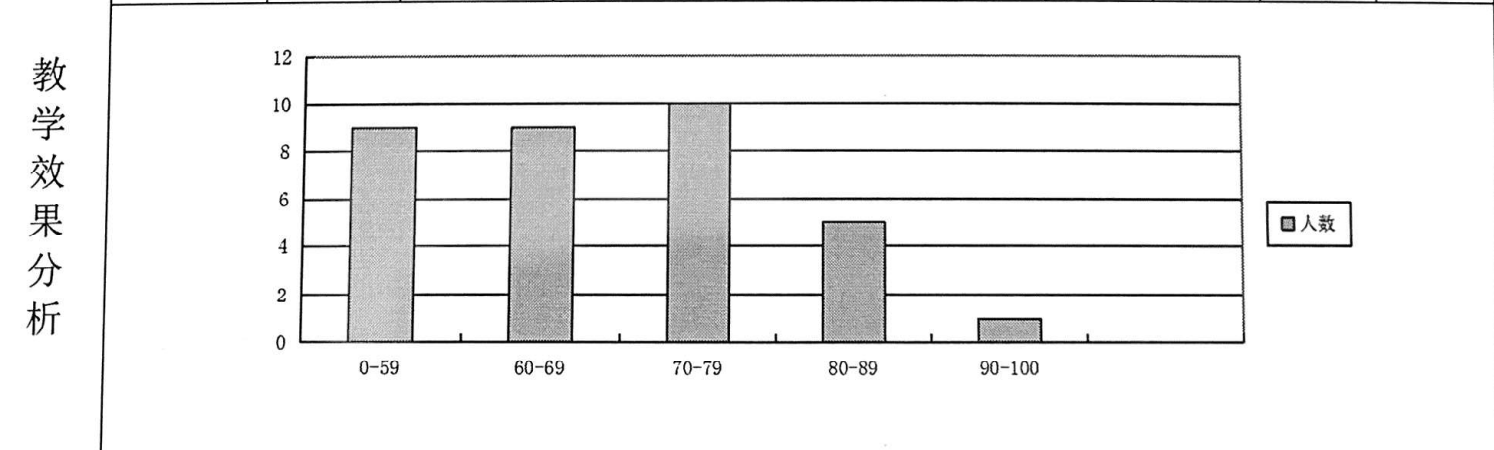
命题质量分析

(1) 试题根据《机器人原理及应用》课程教学大纲的完全贴合, 试题内容涵盖了课堂教学大纲中各章内容。试题考核知识点包含八部分内容, 分布情况: 工业机器人概述 10%; 工业机器人的基本术语 10%; 工业机器人机械系统 20%; 工业机器人数学基础与运动学占 40%; 工业机器人控制系统与检测系统占 10%; 机器人轨迹规划占 5%; 工业机器人应用占 5%。所占比符合课程教学课时分配比例要求。

(2) 命题设计的合理性分析。主客观题比例 3: 2 体现学生知识掌握情况和分析工程问题的能力; 试题的主、客观题比例符合要求, 各种题型的分数选择题 20%, 填空题 20%, 简答题 20%, 分析与计算 40%, 分配合理, 主观题理解分析为主, 测试内容符合课程教学大纲课时分配比例要求。

(3) 难易程度分析。试题难度、深度与教学大纲、教学要求、人才培养要求相符, 既考查了学生对知识的掌握程度, 又考核了学生实际应用、解决问题的能力。

成绩分数段	0~59	60~69	70~79	80~89	90~100	最高分	最低分	平均分	及格率
人数	9	9	10	3	1	91	25	64	71.9%
百分比	28.1%	28.1%	31.3%	9.4%	3.1%				



(1) 成绩分析: 偏度值为-0.56 学生课程成绩分布属于左偏分布, 偏度在-0.47-0.47 之间, 则可以认为分布靠左, 学生整体成绩偏低;

西安航空学院试卷及成绩分析表 (试卷类)

2019 - 2020 学年第 二 学期 开课单位: 机械工程学院

课程性质: <input checked="" type="checkbox"/> 必修, <input type="checkbox"/> 选修		课程名称: 机器人原理及应用																				
任课教师: 王鹏		班级: 机器人工程 181																				
考试时间: 2020.06.12 10:00-12:00																						
试卷来源: <input checked="" type="checkbox"/> 命题 <input type="checkbox"/> 题库 <input type="checkbox"/> 其它		卷别: <input type="checkbox"/> A <input checked="" type="checkbox"/> B		考核方式: <input checked="" type="checkbox"/> 闭卷 <input type="checkbox"/> 开卷 <input type="checkbox"/> 其它																		
卷面 质量 分析	考题要求	基本知识	理解分析	综合运用	合计																	
	分值	19	45	36	100																	
	1、试卷出错: <input checked="" type="checkbox"/> 无 <input type="checkbox"/> 有: 原理性错误(图表、数据等) <u>0</u> 处, 一般性错误 <u>0</u> 处。																					
命题 质量 分析	<p>(1) 试题内容与《机器人原理及应用》课程教学大纲内容完全贴合, 试题内容涵盖了课堂教学大纲中各章内容。试题考核知识点包含 9 部分内容, 分布情况: 工业机器人概述 4 学时占 7%; 工业机器人基本术语 4 学时占 8%; 工业机器人机械系统 6 学时占 16%; 工业机器人数学基础 6 学时占 21%; 运动学占 8 学时占 23%; 工业机器人控制系统 3 学时占 7%; 检测系统 3 学时占 6%; 机器人轨迹规划 4 学时占 8%; 工业机器人应用 2 学时占 4%。各知识模块分值占总分值比例与各部分内容学时所占总学时比例基本吻合。</p> <p>(2) 命题设计的合理性分析。主客观题比例 7: 3 体现学生对基本知识概念掌握情况和运用所学的数学知识以及机械知识分析工业机器人工程问题的能力; 各种题型的分数选择题 20%, 填空题 10%, 简答题 20%, 分析与计算 50%, 主观题 > 50%, 分配合理。</p> <p>(3) 难易程度分析。试题难度适中, 深度与教学大纲、教学要求、人才培养要求相符, 既考查了学生对知识的掌握程度, 又考核了学生实际应用、解决问题的能力。</p> <p>(4) 与往年试题重复率 0%, A、B 卷重复率 0%, 符合学校出题要求。</p>																					
教学 效果 分析	成绩 分数段	0~59	60~69	70~79	80~89	90~100	最高 分	最低 分	平均 分	及格 率												
	人数	1	6	11	11	3	96	54	77.1	96.8%												
	百分比	3.2%	18.7%	34.4%	34.4%	9.3%																
	<table border="1" style="margin: 10px auto; border-collapse: collapse;"> <caption>成绩分布柱状图数据</caption> <thead> <tr> <th>成绩分数段</th> <th>人数</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0~59</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>60~69</td> <td>6</td> </tr> <tr> <td>70~79</td> <td>11</td> </tr> <tr> <td>80~89</td> <td>11</td> </tr> <tr> <td>90~100</td> <td>3</td> </tr> </tbody> </table>										成绩分数段	人数	0~59	1	60~69	6	70~79	11	80~89	11	90~100	3
成绩分数段	人数																					
0~59	1																					
60~69	6																					
70~79	11																					
80~89	11																					
90~100	3																					
	<p>(1) 成绩分析:</p> <p>平均分 77, 平均分在及格线之上, 已经超过 75, 平均成绩超过中等水平。</p> <p>标准差 9.8, 高校课程考试为目标参照型考试。正常的课程考试, 一般要求标准差在参考值</p>																					

范围之内，参考值 5-12 之间。当标准差在合理范围内时，表示学生的学习水平差距不大，试卷的难度适中。

成绩分布 60-69 均为 6 人，占全部人数的将近 20%，不及格占 3.2%，超过 75% 的学生卷面成绩突破 70 分，反应本班学生卷面分数整体较高，达到 70 分以上的中等水平。

(2) 知识点得分及学生掌握情况分析

学生对于工业机器人基本知识掌握较好，基本概念学习到位；对重点问题：教学过程中，针对数学基础问题，进行了预习资料的自学作业测验，学生对于矩阵运算、等知识进行了预习，因此，对于难点问题工业机器人运动学中 D-H 参数坐标系得建立掌握较好，对于涉及四个参数有较明确的理解。得分点较低的内容如下：

1) 选择题第 7 题，个别学生对传感器的“线性度”和“灵敏度”2 个静态参数概念混淆。

2) 填空题第 2 题，答案应该是“防水、防潮气”，学生几乎全部写成“防气”教学过程没有注意给学生进行“防气”和“防潮气”的讲解。

3) 简答题第 2 题，由于课程设置顺序问题，工业机器人机构运动简图属于空间机构，学生还没有学习《机械设计基础》中平面机构运动简图，对于空间机构绘制存在问题。

4) 简答题第 3 题，B 关节实现手腕的俯仰运动，很多同学写成“运动”“回转运动”这都是不对的，回转时 360 都运动，而运动这个词包含的范围更广。俯仰运动是指在一定范围内的运动。

5) 简答题第 4 题，学生没有“仔细”阅读题干，仅仅回答控制系统框图的三个内容，而对于控制系统的类型几乎都忘记作答。

6) 分析与计算第 1 题，作图表示空间坐标系，工业机器人所讲坐标系为右手坐标系，很多同学未能按照右手坐标系进行作答。

7) 分析与计算第 2 题，极个别同学没有理解坐标变换中矩阵左乘和矩阵右乘的概念以及位姿矩阵齐次坐标变换。

8) 分析与计算第 4 题，绝大多数同学求解 1s, 2s, 3s 时刻角位移，瞬时角速度，瞬时角加速度计算正确，但是均不写单位，按照评分标准，计算结果记 0 分，反应学生工程态度不够严谨。

9) 填空题第 4 题，齐次变换矩阵的逆矩阵求解不正确。

学风分析

1. 疫情影响，网络教学，学生平时学习态度积极，没有旷课现象、迟到以及请假现象。
2. 学风基本正常，上课认真听讲，课后能按时交作业，作业质量相对较好，全部学生参加期末考试，参加考试率 100%。
3. 课堂互动提问，同学回答问题都需要老师进行提示才能回答，反应学生课后复习不够扎实，所以平时成绩课堂提问学生成绩基本属于良好。

工作中存在的问题及改进措施

1. 通过试卷和成绩的分析，个人认为试卷内容，分值分配符合要求，成绩分布正常，平均分达到 77.1，超过 75% 的学生达到课程考核的中等水平，及格率达到 96.8%。
2. 教学中，教师应当对于概念的讲解更加精准，避免“防气”和“防潮气”这样的问题发生。
3. 课堂、课后多布置作业练习，提高学生工程数学的计算能力，与此同时对于计算结果一定要注意细节，有工程计算结果的单位。

任课教师（签字）：_____

教研室主任（签字）：_____

2020 年 6 月 30 日

注：表中使用的字符 ，选中的用 ，未选中的用 。红色的说明文字请删除。

课程性质： <input checked="" type="checkbox"/> 必修, <input type="checkbox"/> 选修	课程名称： 机器人原理及应用
任课教师： 王鹏	班级： 机器人工程 182
考试时间： 2020.06.12 10:00-12:00	

试卷来源： <input checked="" type="checkbox"/> 命题 <input type="checkbox"/> 题库 <input type="checkbox"/> 其它	卷别： <input type="checkbox"/> A <input checked="" type="checkbox"/> B	考核方式： <input checked="" type="checkbox"/> 闭卷 <input type="checkbox"/> 开卷 <input type="checkbox"/> 其它
--	--	--

卷面 质量 分析	考题要求	基本知识	理解分析	综合运用	合计
	分值	19	45	36	100

1、试卷出错： 无 有：原理性错误（图表、数据等） 0 处，一般性错误 0 处。

命题质量分析

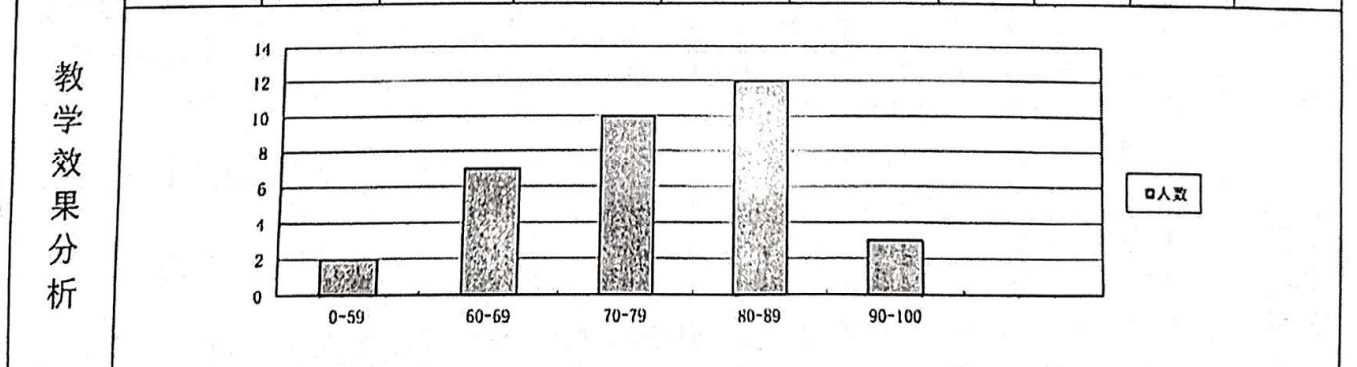
(1) 试题内容与《机器人原理及应用》课程教学大纲内容完全贴合，试题内容涵盖了课堂教学大纲中各章内容。试题考核知识点包含 9 部分内容，分布情况：工业机器人概述 4 学时占 7%；工业机器人基本术语 4 学时占 8%；工业机器人机械系统 6 学时占 16%；工业机器人数学基础 6 学时占 21%；运动学占 8 学时占 23%；工业机器人控制系统 3 学时占 7%；检测系统 3 学时占 6%；机器人轨迹规划 4 学时占 8%；工业机器人应用 2 学时占 4%。各知识模块分值占总分值比例与各部分内容学时所占总学时比例基本吻合。

(2) 命题设计的合理性分析。主客观题比例 7: 3 体现学生对基本知识概念掌握情况和运用所学的数学知识以及机械知识分析工业机器人工程问题的能力；各种题型的分数选择题 20%，填空题 10%，简答题 20%，分析与计算 50%，主观题 > 50%，分配合理。

(3) 难易程度分析。试题难度适中，深度与教学大纲、教学要求、人才培养要求相符，既考查了学生对知识的掌握程度，又考核了学生实际应用、解决问题的能力。

(4) 与往年试题重复率 0%，A、B 卷重复率 0%，符合学校出题要求

成绩分数段	0~59	60~69	70~79	80~89	90~100	最高分	最低分	平均分	及格率
人数	2	7	10	12	3	96	53	76	94.2%
百分比	5.8%	20.6%	29.5%	35.3%	8.8%				



(1) 成绩分析：
 平均分 76，平均分在及格线之上，已经超过 70，平均成绩超过中等水平。
 标准差 11，高校课程考试为目标参照型考试。正常的课程考试，一般要求标准差在参考值范围之内，参考值 5-12 之间。当标准差在合理范围内时，表示学生的学习水平差距不大，试卷的难

度适中。

成绩分布 60-69 均为 7 人，占全部人数的 20.5%，不及格占 5.8%，将近 75% 的学生卷面成绩突破 70 分，反应本班学生卷面分数整体较高，达到 70 分以上的中等水平。

(2) 知识点得分及学生掌握情况分析

绝大部分学生对于工业机器人基本知识掌握较好，基本概念学习到位；对重点问题：教学过程中，针对数学基础问题，进行了预习资料的自学作业测验，学生对于矩阵运算等知识进行了预习，因此，对于难点问题工业机器人运动学中 D-H 参数坐标系得建立掌握较好，对于涉及四个参数有较明确的理解。得分点较低的内容如下：

- 1) 选择题第 7 题，个别学生对传感器的“线性度”和“灵敏度”2 个静态参数概念混淆。
- 2) 填空题第 1 题，工业机器人使用时考虑“允许力矩”，不应写成“力矩”，两个概念混淆。
- 3) 填空题第 2 题，答案应该是“防水、防潮气”，学生几乎全部写成“防气”，教学过程没有注意给学生进行“防气”和“防潮气”的讲解。
- 4) 填空题第 3 题，由于《液压与气动技术》课下学期开设，因此，及个别同学将“减压阀”写成“降压阀”
- 5) 填空题第 4 题，齐次变换矩阵的逆矩阵求解不正确。
- 6) 填空题第 5 题，工业机器人的“连续轨迹控制”方式，得分率较低。
- 7) 简答题第 2 题，由于课程设置顺序问题，工业机器人机构运动简图属于空间机构，学生还没有学习《机械设计基础》中平面机构运动简图，对于空间机构绘制存在问题。
- 8) 简答题第 3 题，B 关节实现手腕的俯仰运动，很多同学写成“运动”“回转运动”这都是不对的，回转时 360 都运动，而运动这个词包含的范围更广。俯仰运动是指在一定范围内的运动。
- 9) 简答题第 4 题，学生没有“仔细”阅读题干，仅仅回答控制系统框图的三个内容，而对于控制系统的类型几乎都忘记作答。
- 10) 分析与计算第 1 题，作图表示空间坐标系，工业机器人所讲坐标系为右手坐标系，很多同学未能按照右手坐标系进行作答或者图解中绕 Y 轴旋转表示不正确。
- 11) 分析与计算第 4 题，绝大多数同学求解 1s, 2s, 3s 时刻角位移，瞬时角速度，瞬时角加速度计算正确，但是均不写单位，按照评分标准，计算结果记 0 分，反应学生工程态度不够严谨。

学
风
分
析

1. 疫情影响，网络教学，学生平时学习态度积极，没有旷课现象，存在极个别请假、迟到的同学，其他同学考勤正常。
2. 学风基本正常，上课认真听讲，课后能按时交作业，作业质量相对较好，全部学生参加期末考试，参加考试率 100%。班级中李洪峰和闫泽同学是留级生，底子较差，也是学院教工党员帮扶对象。作为支部书记，从开始时，就对两位同学提出明确要求，学习过程中反复关注二位同学，最终李洪峰卷面 61，闫泽 55。
3. 课堂互动提问，同学回答问题都需要老师进行提示才能回答，反应学生课后复习不够扎实，所以平时成绩课堂提问学生成绩基本属于良好。

工
作
中
存
在
的
问
题
及
改
进
措
施

1. 通过试卷和成绩的分析，个人认为试卷内容，分值分配符合要求，成绩分布正常，平均分达到 76，将近 75% 的学生达到课程考核的中等水平，及格率达到 94.2%。
2. 教学中，教师应当对于概念的讲解更加精准，避免“防气”和“防潮气”这样的问题发生。
3. 课堂、课后多布置作业练习，提高学生工程数学的计算能力，与此同时对于计算结果一定要注意细节，有工程计算结果的单位。

任课教师（签字）：_____

教研室主任（签字）：_____

2020 年 6 月 30 日

注：表中使用的字符 ，选中的用 ，未选中的用 。红色的说明文字请删除。

教 案

机器人原理及应用 课 1-2 讲

主讲人 王莹 王鹏

课题

工业机器人的概述

目的任务

1. 了解工业机器人的概述。
2. 了解工业机器人的分类及典型应用。
3. 了解工业机器人产业的发展趋势。

重点难点

重点：1.工业机器人在国外和国内的发展现状。
2. 未来制造模式的变革与智能制造。
难点：工业机器人的分类

教学方法

课堂讲授、课堂互动讨论

使用教具

PPT、多媒体、音视频、雨课堂、板书

备课时间

2020年1月20日

上课时间

2020年2月25日

2020年2月27日

主讲教师（签字）：王莹

课程负责人（签字）：

王鹏
2020年2月3日

授课章节： 第1章 工业机器人概论	
<p>教学目的及要求：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 了解工业机器人的概述。 2. 了解机器人的分类及典型应用。 3. 了解工业机器人产业的发展趋势。 	
<p>教学重点：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 机器人的分类及典型应用。 2. 工业机器人在国外和国内的发展现状。 3. 未来制造模式的变革与智能制造。 	
<p>教学难点：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 机器人的发展史。 2. 国内外工业机器人的发展，制造模式的变革与趋势。 	
<p>教学步骤及内容：</p> <p>一、机器人的分类及应用</p>	<p>旁批栏：</p> <p>结合工业机器人发展历程及不同时期的图片</p>
1. 新课导入	
举例说明	
2. 工业机器人发展	
举例说明	
二、国内外工业机器人发展史	
1. 国外机器人发展	
介绍国际上较有影响力的、著名的工业机器人公司主要分为欧系和日系两种。（图片、案例、视频介绍）	
2. 国内机器人发展	
介绍机器人在国内发展的三个阶段	
三、制造模式变革与智能制造	
1. 新工业革命	
2. 中国机器人产业发展现状	
举例说明	
3. 机器人核心技术	
举例说明	

教学内容	教学设计
<p>1.1 工业机器人的认知</p> <p>1、新课导入： 通过 PPT 中的图片结合多媒体视频、电影片段的播放，通过视觉、音效和画面多种方式让学生对机器人具备最直观的感受，在讲述此部分内容时，要引起学生强烈地代入感，将学生引入机器人的世界。首先是让学生理解不同于科幻世界的机器人的现实生活中的机器人，引入“智能机器人”和其发展应用。其次是了解机器人术语的来源和人类设计机器人之初的“三原则”。 经过上面的导入，开始引入机器人的分类和应用。</p> <p>2、机器人分类及应用</p> <p>(1) 机器人的发展趋势 结构的模块化和可重构化、控制技术的开放化、多传感器融合技术的实用化、伺服驱动技术的数字化、人机协作。</p> <p>(2) 机器人的分类</p> <p>①工业机器人：是指在工业生产中使用的机器人的总称，主要用于完成工业生产中的某些作业。 应用：搬运机器人、焊接机器人、喷涂机器人、装配机器人、码垛机器人等。</p> <p>②特种机器人：是指除工业机器人之外的、用于非制造业并服务于人类的各种机器人总称。 应用：农业机器人、医用机器人、家务机器人、娱乐机器人、迎宾机器人、排爆机器人、侦察机器人、战场机器人、扫雷机器人、空间机器人、管道检测机器人、消防机器人、救援机器人等。 举例（视频讲解）：京东智能物流系统、汽车车身焊接生产线、Fanuc 250ia 涂装机器人、德国 KHS 重型单柱码垛机械手、排爆机器人 MK6 、AI 扫地机器人避障赛科沃斯 DG70。</p> <p>3、机器人国外发展概况 介绍国际上较有影响力的、著名的工业机器人公司主要分为欧系和日系两种。</p> <p>①四大家族：瑞士 ABB、德国库卡（KUKA）、日本安川（YASKAWA）、日本发那科（FANUC）。</p> <p>②四小家族：日本松下（Panasonic）、日本欧地希（OTC）、日本那智不二越（NACHI）、日本川崎（Kawasaki）。</p> <p>③其它知名企业：日本爱普生、德国克鲁斯、意大利柯马、韩国现代、瑞士史陶比尔、美国爱德普等。</p> <p>4、机器人发展的标志性成果</p> <p>①国外：</p>	<p>借助 PPT 和多媒体视频、画面给学生直观的感受 引出生活中的机器人来源和三原则，引入课程思政内容：机器是人类文明发展的必然趋势，用双手改变生活、创造美好明天</p> <p>PPT 讲解 案例讲解 图片讲解</p> <p>视频讲解 案例讲解</p> <p>案例讲解 PPT 讲解</p> <p>案例讲解 PPT 讲解</p>

日本：最早，1968 年，第一台机器人 Unimate（日本）；1980 年（机器人普及元年）日本开始在各个领域推广使用机器人。

1980 年~1990 年是日本工业机器人的鼎盛时期。

欧洲：瑞士 ABB 于 1974 年研发了世界上第一台全电控式工业机器人 IRB6。

德国：KUKA 公司在 1973 年研制开发了自己的第一台工业机器人。

美国：1959 年，德沃尔与约瑟夫·英格伯格联手制造出第一台工业机器人--Unimate。

1978 年，Unimation 公司推出通用工业机器人 PUMA，这标志着工业机器人技术已经完全成熟。

②国内：

沈阳新松、广州数控、芜湖埃夫特、哈工大机器人集团、南京埃斯顿、哈尔滨博实。

③重点介绍几种工业机器人：

YASKAWA 生产的可代替人完成组装或搬运机器人 MOTOMAN-DA20 和 MOTOMAN-IA20 。

2010 年意大利柯马（COMAU）推出 SMART5 PAL 机器人，可实现装载 / 卸载、多产品拾取、堆垛等。

KUKA 公司推出 KR 5 arc HW（Hollow Wrist），其机械臂和机械手上有一个 50 mm 宽的通孔，可以保护机械臂上的整套保护气体软管的敷设。

FANUC 推出的 Robot M-3iA 装配机器人采用四轴或六轴模式，具有独特的平行连接结构，具备轻巧便携的特点，承重范围可达 6 kg 。

5、工业机器人在国内的发展

世界各国在发展工业机器人产业上各有不同，可归纳为三种不同的发展模式：

①日本模式：各司其职，分层面完成交钥匙工程。

欧洲模式：一揽子交钥匙工程。

美国模式：采购与成套设计相结合。

得出结论：我国应从“美国模式”着手，在条件成熟后逐步向“日本模式”靠近。

②我国机器人发展的三个阶段

70 年代的萌芽期（在国际掀起工业机器人热潮的背景下开始研制自己的机器人）→80 年代的开发期（第一台弧焊机器人“华宇 I 型”焊接机器人）→90 年代及以后的实用化期（掀起了新一轮的经济体制改革和技术进步热潮）

6、制造模式变革与智能制造

①新的工业模式

面对“新工业革命”预期，发达国家纷纷制定产业发展战略，以抢占未来制造业的全球领先地位。新的工业

重点案例讲解
图片、PPT 讲解

图片、PPT 讲解
案例讲解

引入课程思政内容：
我们国家自主研发和开发的机器人正走向世界，培养学生的爱国情怀，增强民族自豪感和勇于开拓创新的的精神

模式将促使产业组织结构由集中式控制向分散式增强型控制的产业生态转变。

对于制造业而言，成本竞争是一个永恒的话题，但目前我们所面临的现实却是人口红利逐渐消失，劳动力成本猛增。而另一方面，低附加值的现状还在继续，资源环境已不可持续，高端制造竞争力不足，低端制造又面临外流，所以现在不是需要简单的转型升级，而是需要制造模式的变革。

从劳动力短缺、劳动力成本急剧上升、产能过剩、市场需求个性化、技术与产品的快速更新等方面给学生讲解制造业面临的问题以及制造业的模式变革。

②中国机器人产业发展现状

学习习总书记 2014 年两院院士大会上的讲话，机器人革命”有望成为“第三次工业革命”的一个切入点和重要增长点，将影响全球制造业格局，而且我国将成为全球最大的机器人市场。

截至 2007 年年底,我国已有 130 多台(套)喷涂机器人在 20 余家企业的近 30 条自动喷涂生产线(站)上获得规模应用。弧焊机器人已应用在汽车制造厂的焊装线上。20 世纪 90 年代中期,我国 6000m 以浅的深水作业水下机器人试验成功。以后的近 10 年中,在步行机器人、精密装配机器人和多自由度关节机器人等国际前沿领域,我国逐步缩小了与世界先进水平的差距。

③影响未来的颠覆性技术

包括移动互联网、物联网、先进机器人在内的 12 项技术。

④高端制造业的问题

核心技术、基础工业和人才

7、工业机器人核心技术

高精度机器人减速机

伺服电机和驱动器

机器人控制器

8、课堂互动

PPT 讲解
案例讲解

引入课程思政：通过学习习总书记讲话内容，建立对“机器人工业革命”的认识。

PPT 讲解
图片讲解

雨课堂

教 案

机器人原理及应用 课 3-4 讲

主讲人 王莹 王鹏

课题

工业机器人基础知识

目的任务

1. 掌握工业机器人基本组成及技术参数。
2. 了解工业机器人的分类及典型应用。

重点难点

重点：工业机器人基本组成及技术参数。
难点：工业机器人的选型

教学方法

开放实验、课堂讲授、课堂互动讨论

使用教具

PPT、多媒体、音视频、雨课堂、板书

备课时间

2020年2月10日

上课时间

2020年3月3日

2020年3月5日

主讲教师（签字）：王莹

课程负责人（签字）：王鹏

2020年3月3日

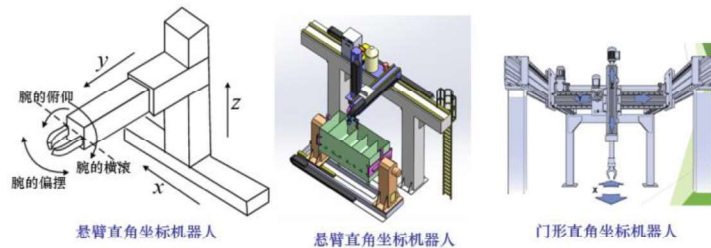
授课章节： 第二章 工业机器人基础知识	
<p>教学目的及要求：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 掌握工业机器人基本组成及技术参数。 2. 了解工业机器人的分类及典型应用。 	
<p>教学重点：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 工业机器人基本组成及技术参数。 2. 工业机器人的分类及典型应用。 	
<p>教学难点：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 工业机器人基本组成及技术参数。 2. 工业机器人的选型 	
<p>教学步骤及内容：</p> <p>二、工业机器人基本组成及技术参数</p> <p>1. 工业机器人基本组成</p> <p>举例说明，基本组成：1) 机器人本体含机座、腰部、腕部和手部 2) 驱动、传动装置及控制器；3) 传感器；4) 示教器等</p> <p>2. 工业机器人技术参数</p> <p>举例说明并解释技术参数主要有：1) 自由度；2) 分辨率；3) 定位精度和重复定位精度；4) 作业范围；5) 运动速度；6) 承载能力</p> <p>三、工业机器人的分类及典型应用</p> <p>1. 工业机器人分类</p> <p>举例说明</p> <p>2. 工业机器人典型应用</p> <p>举例说明</p> <p> </p> <p> </p> <p> </p> <p> </p> <p> </p> <p> </p> <p> </p> <p> </p> <p> </p> <p> </p>	旁批栏：

教学内容	教学设计
<p>课程回顾： 工业机器人的分类及工业机器人的发展模式 新课导入：</p> <p>1.2 工业机器人的定义及特点</p> <p>1、定义 美国机器人协会：工业机器人是一种用于移动各种材料、零件、工具或专用装置，通过可编程序动作来执行各种任务，并具有编程能力的多功能机械手。 日本机器人协会：一种带有存储器件和末端执行器的通用机械，它能够通过自动化的动作替代人类劳动。 中国：机器人是一种自动化的机器，所不同的是这种机器具备一些与人或生物相似的智能能力，如感知能力、规划能力、动作能力和协同能力，是一种具有高度灵活性的自动化机器。 蒋新松院士给出的定义：机器人是一种拟人功能的机械电子装置。 ISO：工业机器人是一种用于移动各种材料、零件、工具或专用装置，通过可编程序动作来执行各种任务，并具有编程能力的多功能机械手。</p> <p>2、特点</p> <p>工业机器人的特点</p> <ul style="list-style-type: none"> ① 拟人化 ② 通用性 ③ 独立性 ④ 智能性 <p>(1) 拟人化：在机械结构上类似于人的手臂或者其他组织结构。 举例：六轴搬运机器人、弧焊机器人</p> <p>(2) 通用性：可执行不同的作业任务，动作程序可按需求改变。 案例： 焊接机器人：可针对不同形状零件进行焊接 搬运机器人：搬运不同的工件，不同放置点</p> <p>(3) 独立性：完整的机器人系统中在工作中可以不依赖于人的干预。 案例：码垛机器人、焊接机器人生产线</p> <p>(4) 智能性：具有不同程度的智能性，如感知系统、记忆等。 案例： 检测机器人、鲁班锁益智机器人</p> <p>1.3 工业机器人的分类及应用 专业术语：Prismatic pairs (移动副)、Revolute pairs (转动副)</p> <p>1、分类：</p>	<p>PPT 讲解 国际标准讲解</p> <p>PPT 讲解 案例讲解 图片讲解</p>

(1) 按结构运动形式分类:



①直角坐标机器人: EDUBOT-直角坐标机器人



通过三个相互垂直轴线上的移动来改变手部的空间位置。

空间轨迹求解容易, 编程控制容易, 定位精度高。本体占空间体积大, 工作空间小, 操作灵活性差。

②柱面坐标机器人: 柱面坐标机器人—Versatran

通过两个移动和一个转动实现手部空间位置的改变。手臂可沿 r 方向伸缩; 滑动架(或托板)可沿柱可沿 z 轴上下移动; 水平臂和滑动架组合件可作为基座上的一个整体绕 z 轴旋转。

运动模型简单, 可获得较高的速度, 可输出较大的动力, 能够伸入型腔式机器内部, 本体所占空间体积比直角坐标机器人小。可以达到的空间受到限制; 末端执行器离立柱中心越远, 精度越低; 手臂后端会碰到工作范围内的其它物体。

③球面坐标机器人: 球面坐标机器人—Unimate

通过一个移动、一个摆动和一个转动实现手部空间位置的改变。手臂可沿 R 方向伸缩; 手臂可绕立柱摆动; 立柱可绕基座选择。本体所占空间体积小, 结构紧凑; 中心立柱附近的工作范围大; 伸缩关节的线位移恒定。

轨迹求解较难, 难于控制。

④水平多关节机器人: EDUBOT-水平关节机器人



案例讲解
图片讲解

案例讲解
图片讲解

图片讲解
PPT 讲解
案例讲解

由多个转动关节串联起若干连杆组成。
结构紧凑，工作范围广且占用空间小，动作灵活，具有很高的可达性。

运动学模型复杂，高精度控制难度大。

(2) 按机械结构分类：

① 串联机构机器人：FANUC

各连杆组成一开式机构链，由一系列连杆通过转动关节或移动关节串联而成。一般来说，串联机器人每个连杆上都要安装驱动器，通过减速器来驱动下一个连杆。

结构简单，成本低，控制简单，运动空间大；累积误差较大。

② 并联机器人：EDUBOT-Delta 机器人

并联机器人在动平台和静平台间至少通过两个独立的运动链相连，机构具有两个或两个以上自由度，且以并联方式驱动。

无累积误差，精度较高；运动部分重量轻，速度高，动态响应好；结构紧凑，刚度高，承载能力大；工作空间小；运动模型复杂。

而只有一条运动链的机器人称为串联机器人。

(3) 其他分类：

① 按运动控制方式分类

非伺服机器人、伺服机器人

② 按程序输入方式分类：

编程输入型机器人、示教输入型机器人

③ 按发展程度分类：

第一代机器人、第二代机器人、第三代机器人、第四代机器人

2、应用

恶劣工作环境及危险工作：

热锻车间机器人、压铸车间机器人

自动化生产领域：

搬运机器人、焊接机器人、喷涂机器人、装配机器人、激光雕刻机器人、检测机器人

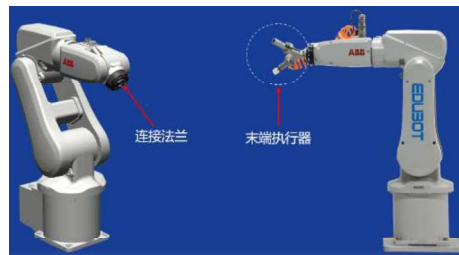
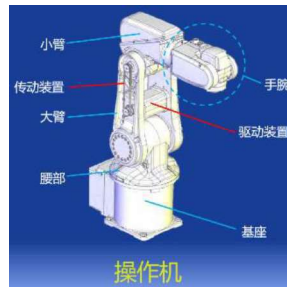
第二章 工业机器人基本知识

2.1 基本组成

示教器：工业机器人的人机交互接口，机器人的绝大部分操作均可通过示教器来完成。

操作机：又称机器人本体，是工业机器人的机械主体，是用来完成规定任务的执行机构。它主要由机械臂、驱动装置、传动装置和内部传感器等部分组成。

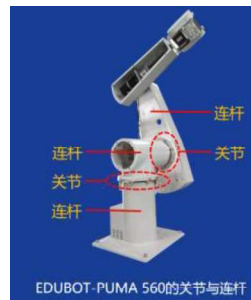
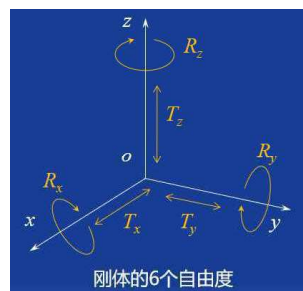
控制器与控制系统：用来控制工业机器人按规定要求动作，是机器人的关键和核心部分。



2.2 基本术语

刚体：在任何力的作用下，体积和形状都不发生改变的物体。

自由度：描述物体运动所需要的独立坐标数。



连杆：是指工业机器人机械臂上被相邻两关节分开的部分,是保持各关节间固定关系的刚体。

关节：即运动副，是允许工业机器人机械臂各零件之间发生相对运动的机构，是两构件直接接触并能产生相对运动的活动联接。

关节类型：转动关节、回转移动关节、球关节

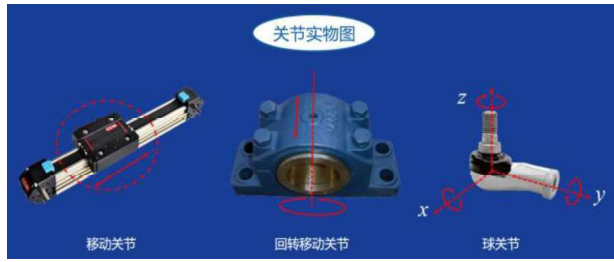
转动关节：是使连续两个杆件的组件中的一件相对于另一件绕固定轴线转动的关节，两个构件之间只作相对转动。

移动关节：是使两个杆件的组件中的一件相对于另一件作直线运动的关节，两个杆件之间只作相对移动。

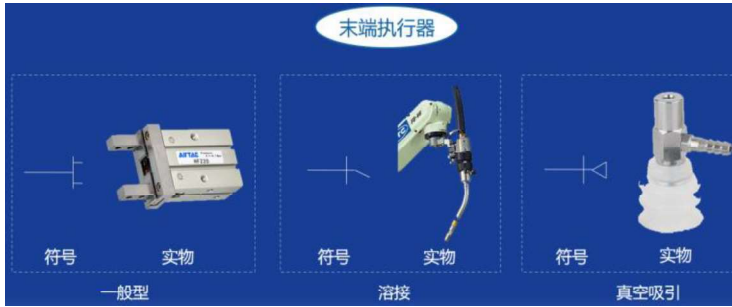
回转移动关节：是使两个杆件的组件中的一件相对于另一件移动和绕一个移动轴线转动的关节，两个杆件之间既作相对移动又作相对转动。

球关节：是使两个杆件的组件中的一件相对于另一件在三个自由度上绕一固定点转动的关节。

PPT 讲解
案例讲解
图片讲解
实物讲解

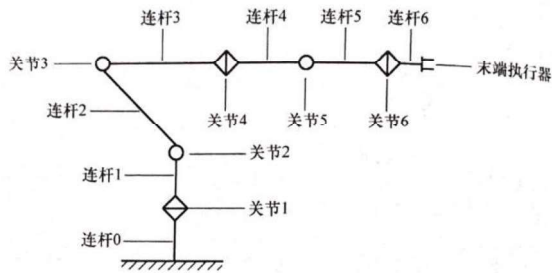


关节实物图



末端执行器实物图

工业机器人运动简图:



2.3 机器人图形符号



图2-6 IRB 2400的结构简图

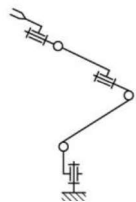
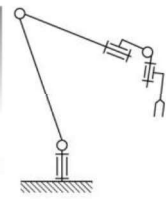
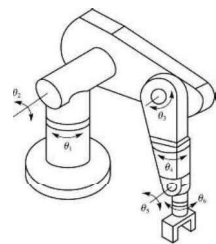


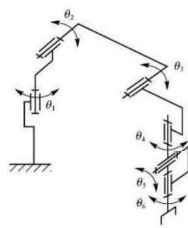
图2-7 R-2000iB的结构简图



机构运动示意图可以简化为机构运动原理图，以明确主要因素。



(a) 机构运动示意图



(b) 机构运动原理图

PPT 讲解
案例讲解
图片讲解

PUMA-262 机器人的机构运动示意图和机构运动原理图

运动轴：

机器人轴：又称本体轴，是指机器人操作机的机械臂运动

基座轴：使机器人移动的轴的总称，主要指行走轴

工装轴：除机器人轴、基座轴以外的轴的总称，使工件、工装夹具翻转和回转的轴

工具中心点：Tool Center Point, TCP, 机器人系统的控制点，出厂时默认于最后一个运动轴或连接法兰的中心。

大地坐标系：大地坐标系是建立在工作单元或工作站中的固定坐标系，如图中的坐标系 $O_0-X_0Y_0Z_0$ ，用于确定若干个机器人或外轴移动的机器人的位置。

在默认情况下，一般大地坐标系与基坐标系是重合的。

工具坐标系：工具坐标系 (Tool Control Frame, TCF) 的原点定义在 TCP 点，并且假定工具的有效方向为 Z 轴 (有些机器人厂商将工具的有效方向定义为 X 轴)，而 X 轴、 Y 轴由右手规则确定，如图中的坐标系 $O_2-X_2Y_2Z_2$ 。

工件坐标系：工件坐标系又称用户坐标系，是以基坐标系为参考，在工件或工作台上建立的坐标系，如图中的坐标系 $O_3-X_3Y_3Z_3$ 。

工件坐标系优势：当机器人运行轨迹相同，工件位置不同，只需要更新工件坐标系即可，无需重新编程。

2.4 主要技术参数

自由度：机器人的自由度是指工业机器人能够对坐标系进行独立运动的数目，不包括末端执行器的动作，如焊接、喷涂等。

采用空间开链连杆机构的机器人，因每个关节运动副仅有一个自由度，所以机器人的自由度数就等于它的关节数。

7 个以上的自由度是冗余自由度，是满足复杂工作环境和多变的工作需求。而完成某一特定作业时具有多余自由度的机器人称为冗余度机器人。

额定负载：也称有效负荷，是指正常作业条件下，工业机器人在规定性能范围内，手腕末端所能承受的最大载荷。**0.5kg-2300kg**

最大工作速度：指在各轴联动情况下，机器人手腕中心或者工具中心点所能达到的最大线速度。

分辨率：指工业机器人每根轴能够实现的最小移动距离或最小转动角度。

定位精度：又称绝对精度，是指机器人的末端执行器实际到达位置与目标位置之间的差距。

重复定位精度：指在相同的运动位置命令下，机器人连续若

PPT 讲解
案例讲解
图片讲解

干次运动轨迹之间的误差度量或指在相同的运动位置命令下，机器人重复定位其末端执行器于同一目标位置的能力，以实际位置值的分散程度来表示。

2.4 运动原理

机械原点：指机器人某一本体轴的角度显示为 0° 时的状态。

原点位置：指机器人本体的各个轴同时处于机械原点时的姿态，工业机器人的工作空间通常是相对于自身本体的原点位置而言的。

工作空间：又称工作范围、工作行程，是指工业机器人作业时，手腕参考中心（即手腕旋转中心，P 点）所能到达的空间区域，不包括手部本身所能达到的区域，常用图形表示。

垂直多关节机器人的工作空间：机器人空间是指机器人末端执行器运动描述参考点所能达到的空间点的集合，一般用水平面和垂直面的投影表示。

举例： ABB_IRB120 工业机器人案例

工业机器人的选择：

ABB_IRB120 工业机器人技术参数

ABB_IRB120 工业机器人控制系统参数

IRB120 数字模型：

IRB120 二维数字模型（整机外部结构二维图，底座安装示意图）

IRB120 三维数字模型（Robotstudio）

IRB120 三维数字模型（Solid works）

IRB120 实用案例分享：

IRB120_机械机构柔性运动、IRB120_虚拟装配、IRB120_虚拟涂胶、IRB120_mouse 装配、IRB120_相机装配

课堂讨论： ABB IRB1600 选型分析

IRB 1600 最高性能 10kg 机器人。

主要特点和优势：

产量翻倍：

与物料搬运、上下料和过程应用领域的其他同类机器人相比，IRB1600 的作业周期缩短了一半。

无需担忧边角切割问题：

高速运行时，大多数机器人都存在边角切割的问题。

IRB1600 机器人采用了独特的“大脑”与“肌肉”组合，无论速度多快，都能确保作业路径始终如一。

出色的可靠性：

IRB1600 具有出色的可靠性，即便在最恶劣的作业环境下，或是要求最严格的全天候作业中，该款机器人都能应对自如。

便于集成：

安装十分灵活： IRB1600 可采用支架式、壁挂式、倾斜式或倒

PPT 讲解
案例讲解
图片讲解

课堂讨论


置式安装，甚至可以安装在设备内部。可持续性与健康采用低摩擦齿轮，QuickMove 和 TrueMove 可避免不必要的动作，最大速度下的功耗降至 0.58kW，低速运转时功耗更低。

课堂小结

教 案

机器人原理及应用 课 5-7 讲

主讲人 王晋鹏 王鹏

课题	工业机器人的机械系统		
目的任务	<ol style="list-style-type: none">1.了解工业机器人基座的基本类型；2.熟悉工业机器人手臂的组成及典型结构，能够分析工程实际中机器人手臂的组成原理；3.熟悉工业机器人手臂的组成和运动原理，能够分析工程实际中机器人手腕的运动原理；4.掌握工业机器人中末端执行器的类型，能够根据工件的特点选择末端执行器的类型；5.熟悉工业机器人中常用传动机构的类型；6.通过引入习近平总书记的讲话，结合我国目前在减速器方面的生产现状，培养学生科技报国的使命担当。		
重点难点	重点：工业机器人手臂、手腕的结构及末端执行器的类型 难点：3自由度手腕的运动原理，谐波齿轮和RV减速器的工作原理		
教学方法	开放实验、课堂讲授、课堂互动讨论，启发式提问、雨课堂		
使用教具	板书、多媒体、雨课堂		
备课时间	2020年1月25日	上课时间	2020年3月10日 2020年3月12日 2020年3月17日
		主讲教师（签字）：	王晋鹏
		课程负责人（签字）：	
			2020年2月24日

授课章节： 第三章 工业机器人的机械系统	
<p>教学目的及要求：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 了解工业机器人的机座及其分类。 2. 熟悉工业机器人的臂部及其组成。 3. 熟悉工业机器人的腕部及其运动和驱动方式。 4. 掌握工业机器人的手部即末端执行器。 5. 熟悉工业机器人的传动机构。 	
<p>教学重点：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 工业机器人的机座及其分类。 2. 工业机器人的臂部及其组成。 3. 工业机器人的腕部及其运动和驱动方式。 4. 工业机器人的手部即末端执行器 5. 工业机器人的传动机构。 	
<p>教学难点：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 工业机器人的腕部及其运动和驱动方式。 2. 工业机器人的传动机构。 	
<p>教学步骤及内容：</p> <p>一、工业机器人的机座及其分类</p>	旁批栏：
<ol style="list-style-type: none"> 1. 工业机器人的机座 2. 工业机器人分类 	
<p>二、工业机器人的臂部及其组成</p>	实例教学、图片讲解
<ol style="list-style-type: none"> 1. 工业机器人的臂部定义 2. 工业机器人臂部组成 	
<p>三、工业机器人的腕部及其运动和驱动方式</p>	实例教学结合课堂测试
<ol style="list-style-type: none"> 1. 工业机器人的腕部定义 2. 工业机器人的腕部及其运动和驱动方式 	
<p>四、工业机器人的手部即末端执行器</p>	启发式提问结合实例讲解
<ol style="list-style-type: none"> 1. 工业机器人的手部定义 2. 工业机器人手爪中的典型结构 	
<p>五、工业机器人中的传动装置</p>	实物教学、以实验室中的实物讲解
<ol style="list-style-type: none"> 1. 谐波齿轮传动 2. RV减速器 	
	课程思政

教学内容	教学设计
<p style="text-align: center;">第3章 工业机器人机械系统</p> <p>3.1 工业机器人机座</p> <p>(1) 机座的作用：①支承机器人的机身、臂部和手部，因而必须具有足够的刚性和稳定性。②根据作业任务的要求，带动机器人实现在更广阔的空间内运动。</p> <p>(2) 机座的组成：行走驱动装置、传动机构、位置检测元件、传感器、电缆及管路</p> <p>(3) 机座的类型</p> <p>①固定式</p> <p>②移动式：车轮式、履带式、关节式</p> <p>3.1.1 车轮式行走机构</p> <p>(1) 三轮式</p> <p>优点：具有一定的稳定性</p> <p>缺点：稳定性差，移动方向难于控制</p> <div data-bbox="368 1010 850 1370" data-label="Image"> </div> <p style="text-align: center;">图1 三轮式行走机构</p> <p>(2) 四轮式</p> <p>优点：承载能力大，稳定性好。</p> <p>缺点：成本较高</p> <div data-bbox="443 1585 919 1942" data-label="Image"> </div> <p style="text-align: center;">图2 四轮式行走机构</p>	

3.1.2 履带式行走机构

缺点：在横向和前进方向也会产生滑动,转弯阻力大,不能准确地确定回转半径等

创新：形状可变式履带行走机构。该履带形状可以适应台阶形状而改变,比一般履带式机器人的动作更为灵活。

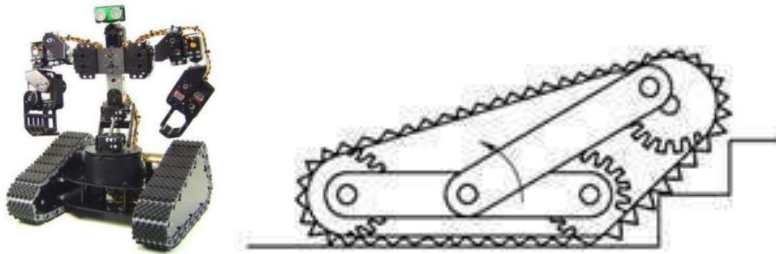


图3 履带式行走机构

3.1.3 关节式行走机构

类似于动物那样,利用脚部关节机构、用步行方式实现移动的机械,称做步行机构。步行机器人采用步行机构,其特征是能够在凹凸不平的地面上行走、跨越沟壑和上下台阶,因而具有广泛的适应性,但控制上有相当的难度。

足式步行机构有双足、三足、四足、六足、八足等形式。

3.1.4 各类行走机构的对比

车轮式：运动的灵活、快速；但着地面积小

履带式：越障和带载能力强；但体积较大,不易转弯

步行式：负重能力和对地面的适应性强；但行走较慢

3.2 工业机器人手臂机构

3.2.1 手臂的作用及设计要求

(1)作用：支承手部和腕部,并改变手部空间位置的机构

(2)设计要求

①手臂应具有足够的承载能力和刚度

②导向性好

③运动要平稳、定位精度要高,应注意减轻重量和运动惯量

3.2.2 手臂直线运动机构

行程小时：采用油缸或气缸直接驱动；

行程较大时：可采用油缸或汽缸驱动齿条传动的倍增机构或采用步进电机或伺服电机驱动,并通过丝杆螺母来转换为直线运动。

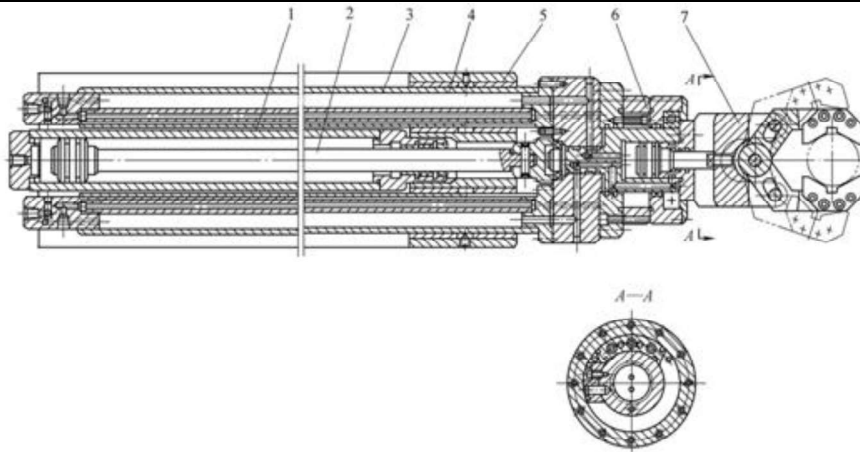


图 4 典型手臂直线运动机构

1—双作用液压缸 2—活塞杆 3—导向杆 4—导向套 5—支承座 6—手腕回转缸 7—手部的夹紧液压缸

3.2.2 手臂回转运动机构

实现机器人手臂回转运动的机构形式是多种多样的,常用的有叶片式回转缸、齿轮传动机构、链轮传动机构和连杆机构。

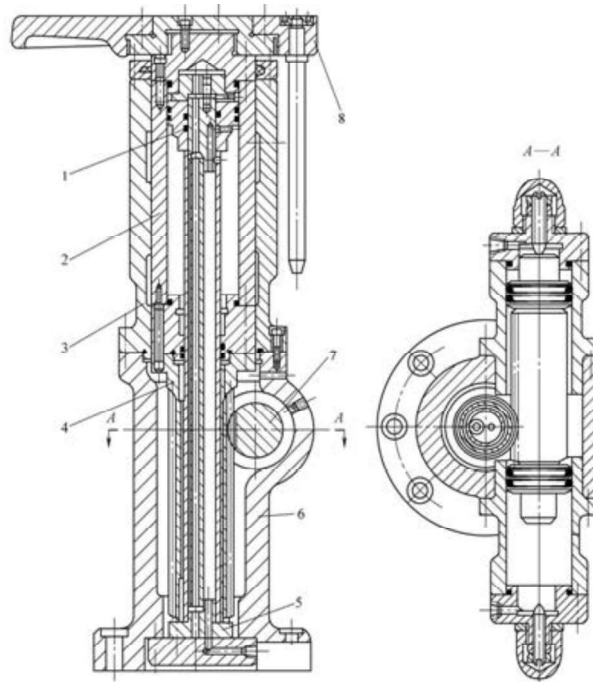


图 5 手臂做升降和回转运动的结构示意图

1—活塞杆 2—升降缸体 3—导向套 4—齿轮
5—连接盖 6—机座 7—齿条活塞 8—连接板

活塞液压缸两腔分别进液压油推动齿条活塞 7 做往复移动(见 A—A 剖面), 与齿条活塞 7 啮合的齿轮 4 即做往复回转。

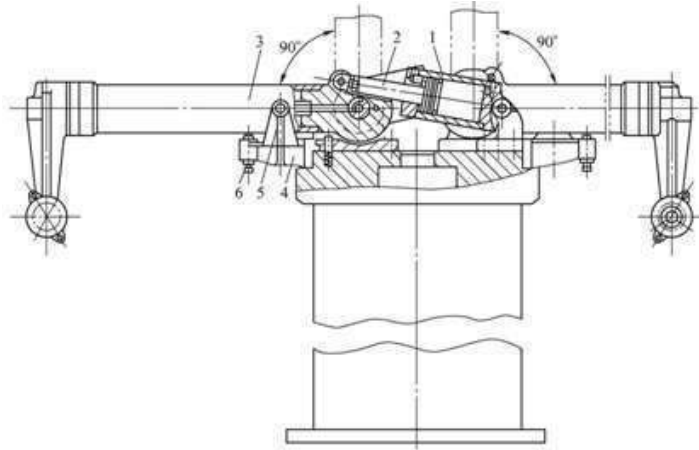


图 6 双臂机器人手臂结构示意图

1—铰接活塞液压缸 2—连杆(即活塞杆) 3—曲杆(即手臂)
4—支承架 5、6—定位螺钉

手臂的上下摆动由铰接活塞液压缸和连杆机构来实现。当铰接活塞液压缸 1 的两腔通液压油时, 通过连杆 2 带动曲杆 3(即手臂)绕轴心做 90° 的上下摆动(如图中细双点画线所示位置)。手臂下摆到水平位置时, 其水平和侧向的定位由支承架 4 上的定位螺钉 6 和 5 来调节。

3.2.3 手臂俯仰运动机构

机器人手臂的俯仰运动一般采用活塞液压(气)缸与连杆机构联用来实现。手臂的俯仰运动使用的活塞缸位于手臂的下方, 其活塞杆和手臂用铰链连接, 缸体采用尾部耳环或中部销轴等方式与立柱连接。此外, 还有采用无杆活塞缸驱动齿轮齿条或四连杆机构实现手臂俯仰运动的。

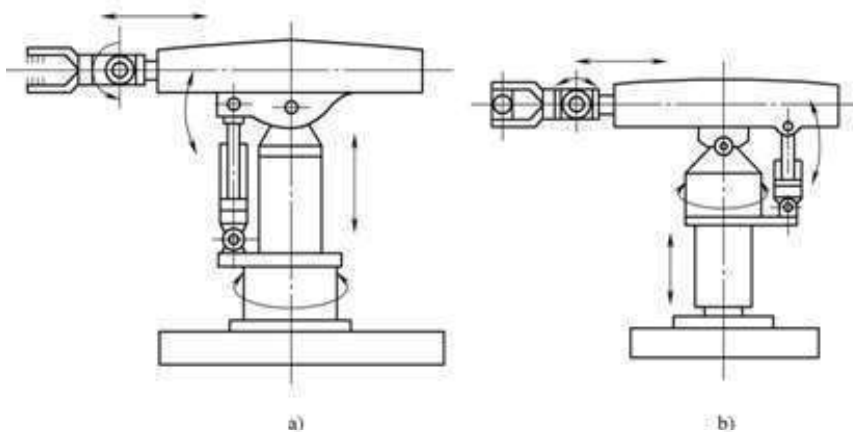


图 7 驱动缸带动手臂俯仰运动结构示意图

a) 驱动缸前置式结构 b) 驱动缸后置式结构

3.3 工业机器人手腕机构

3.3.1 手腕的作用和设计要求

(1) 作用：支承手部和改变手部姿态。

(2) 设计要求

①**结构紧凑、重量轻**。手腕处于手臂的最前端，它连同手部的静、动载荷均由臂部承受。显然，手腕的结构、重量和载荷直接影响着手臂的结构、重量和运动性能。因此要求手腕机构紧凑、重量轻。

②**布局合理**。设计手腕时，要综合考虑合理布局。比如说手腕与手臂和手部之间的连接，手腕各个自由度的检测、管线布置，以及润滑、维修、调整等问题。

③**应充分考虑工作环境的对手腕的不良影响**。

3.3.2 手腕的基本类型

(1) 按驱动位置分类

①**直接驱动手腕**：手腕因为装在手臂末端，所以必须设计得十分紧凑，可以把驱动源装在水腕上。直接驱动手腕的关键是能否选到尺寸小、重量轻而驱动力矩大、驱动特性好的驱动电机或液压驱动马达。

②**远距离传动手腕**：远距离传动的的好处是可以把尺寸、重量都较大的驱动源放在远离手腕处，有时放在手臂的后端作平衡重量用，不仅减轻手腕的整体质量，而且改善了机器人整体结构的平衡性。

(2) 按自由度数目分类

①单自由度手腕

R 关节：组成转动副关节的两个构件自身几何回转中心和转动副回转轴线重合，多数情况下，手腕的关节轴线与手臂的纵轴线共线。

B 关节：组成转动副关节的两个构件自身几何回转中心和转动副回转轴线垂直，多数情况下，关节轴线与手臂及手的轴线相互垂直。

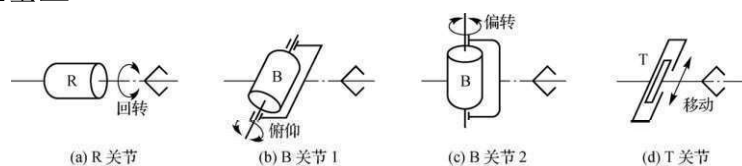


图 8 单自由度手腕示意图

②二自由度手腕

二自由度手腕可以由一个 R 关节和一个 B 关节组成的 BR 手腕，也可以是由两个 B 关节组成的 BB 手腕。二自由度手腕中最常用的是 BR 手腕。

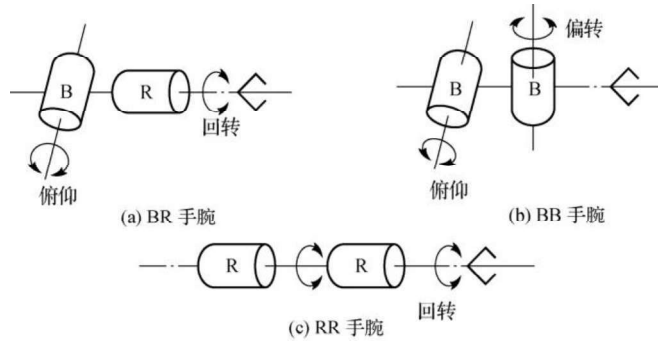


图 9 二自由度手腕示意图

③三自由度手腕

三自由度手腕可以由 B 关节和 R 关节组成的多种形式的手腕。

为了使手腕结构紧凑，通常把两个 B 关节安装在一个十字接头上。

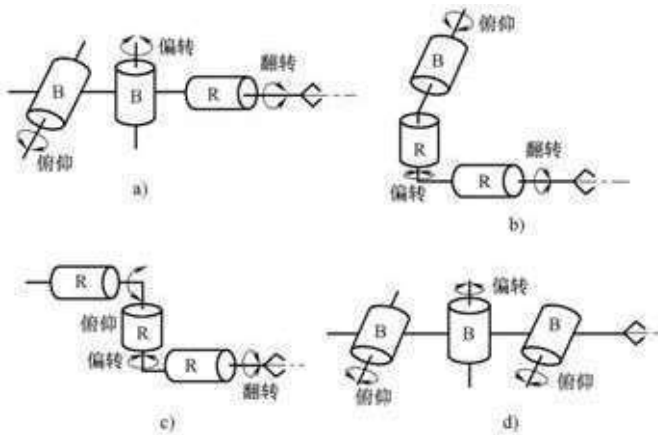


图 10 三自由度手腕示意图

a)BBR 手腕 b)BRR 手腕 c)RRR 手腕 d)BBB 手腕

3.3.3 典型手腕结构

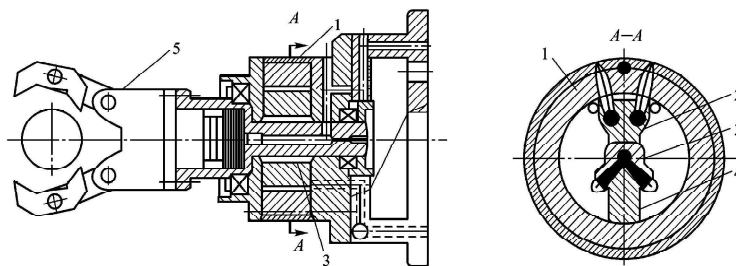


图 11 单自由度手腕的典型结构

轮 11-腕摆壳体转动-手腕偏转

回转运动：S 轴-齿轮 1-齿轮 3-齿轮 2-锥齿轮 4-锥齿轮 5-锥齿轮 6-锥齿轮 7-手腕回转

提问：B 轴回转，S 轴和 T 轴不动时有没有附加的回转运动？

3.4 工业机器人末端执行器

3.4.1 末端执行器的作用及设计要求

(1) 作用：工业机器人的手部是装在工业机器人手腕上直接抓握工件或执行作业的部件。工业机器人的手部也叫末端执行器。

(2) 特点

①**手部与手腕相连处可拆卸**：根据夹持对象的不同，手部结构会有差异，通常一个机器人配有多个手部装置或工具，因此要求手部与手腕处的接头具有通用性和互换性。

②**手部的通用性比较差**：机器人手部通常是专用的装置，比如：一种手爪往往只能抓握一种或几种在形状、尺寸、重量等方面相近似的工件；一种工具只能执行一种作业任务。

(3) 设计要求

①**应具有一定的开闭范围**：开闭范围是指手指从张开的极限位置到闭合夹紧位置间变动量。开闭范围太小，影响通用性。

②**具有合适的夹持力**：夹持力不宜过小，防止运动过程中工件脱落，同时夹紧力不宜过大，防止损坏工件。

③**保证工件在手指内的定位精度**：根据工件形状、加工精度和装配精度的要求，选择适当的手指形状和手部结构。

④**结构紧凑，重量轻，效率高。**

⑤**尽量提高通用性。**

3.4.2 末端执行器的类型

(1) 按用途分类

①**手爪**：手爪具有一定的通用性，它的主要功能是：抓住工件—握持工件—释放工件。

②**专用操作器**：专用操作器也称作工具，是进行某种作业的专用工具，如机器人涂装用喷枪、机器人焊接用焊枪等。

(2) 按工作原理分类

①**机械手爪**：通常依靠摩擦力、支持力或吊钩拉力承担目标对象的重力。

②**吸附类手爪**：依靠手爪的吸力或磁力承担目标对象的重力。

可分为磁力类吸盘和真空类吸盘。

(3) 按夹持方式分类

①外夹式手爪：手部与被夹件的外表面相接触。

②内撑式手爪：手部与被夹件的内表面相接触。

③内外夹持式手爪：手部与被夹件的内、外表面相接触。

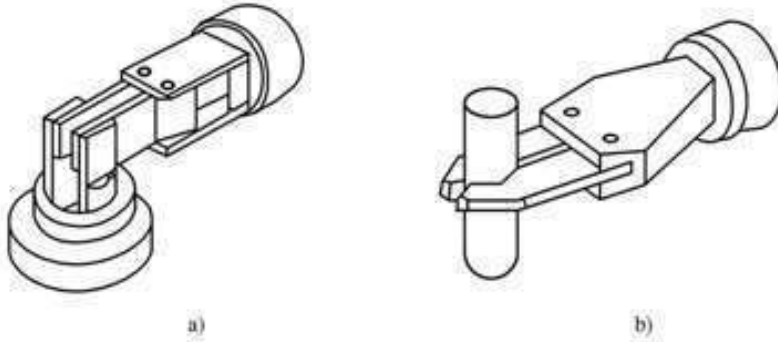


图 14 内撑式手爪和外夹式手爪

3.4.3 工业机器人手爪的典型结构

(1) 夹持式手爪的典型结构

根据爪钳运动方式的不同，夹持式手爪可分为回转型手爪和平移型手爪。

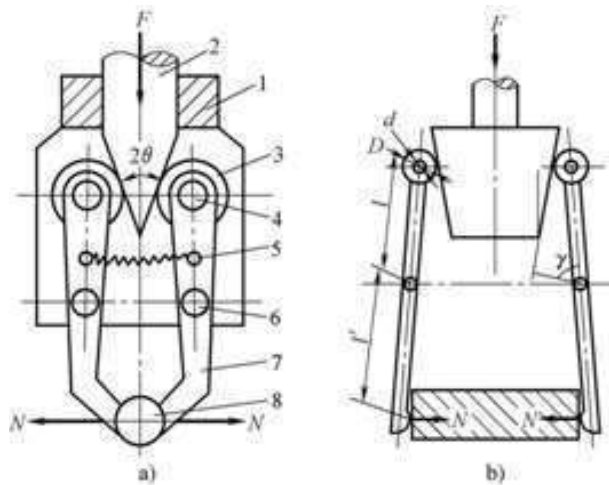


图 12 回转型手爪的典型结构 1

1—壳体 2—斜楔驱动杆 3—滚子 4—圆柱销 5—拉簧 6—铰销 7—手指 8—工件

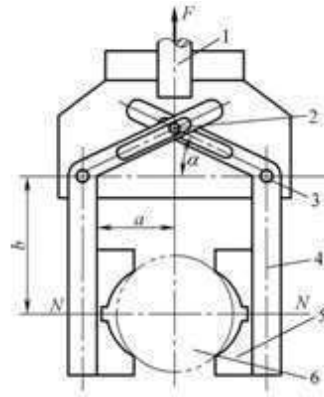


图 13 回转型手爪的典型结构 2

1—驱动杆 2—圆柱销 3—铰销 4—杠杆形手指 5—V 形块
6—圆形工件

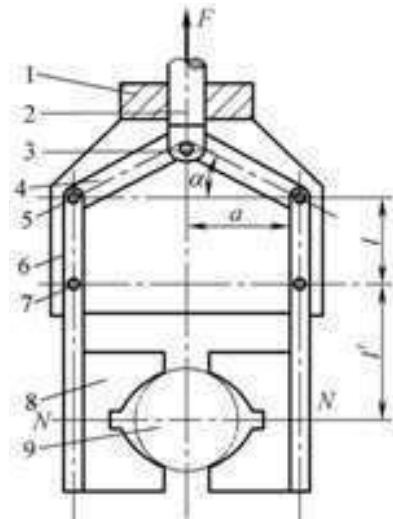


图 14 回转型手爪的典型结构 3

1—壳体 2—驱动杆 3—铰销 4—连杆
5、7—圆柱销 6—手指 8—V 形块 9—工件

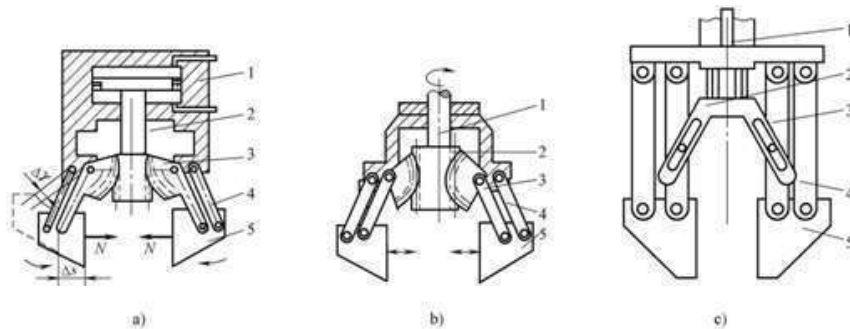


图 15 平移型手爪的典型结构

a) 齿条齿轮传动的手部结构 b) 蜗杆蜗轮传动的手部结构
c) 连杆斜滑槽传动的手部结构

1—驱动器 2—驱动元件 3—驱动摇杆 4—从动摇杆 5—手指

3.4.4 吸附式手爪的典型结构

根据吸附力的种类不同,吸附式取料手可以分为磁吸式和气吸式两种。

(1) 磁吸式手爪

磁吸式手部是利用永久磁铁或电磁铁通电后产生磁力来吸取铁磁性材料工件的装置。

(2) 气吸式手爪

气吸式手部是利用橡胶皮碗或软塑料碗中所形成的负压把工件吸住的装置。适用于薄铁片、板材、纸张、薄而易脆的玻璃器皿和弧形壳体零件等的抓取。按形成负压的方法,可以将气吸式手部分为:真空式、气流负压式和挤气负压式三种吸盘。

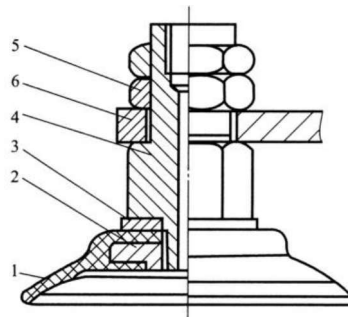


图 16 真空吸附式吸盘

1-橡胶吸盘 2-固定环 3-垫片 4-支撑杆 5-基板 6-螺母

取料时,碟形橡胶吸盘与物体表面接触,橡胶吸盘在边缘既起到密封作用,又起到缓冲作用,然后真空抽气,吸盘内腔形成真空,吸取物料。放料时,管路接通大气,失去真空,物体放下。为避免在取、放料时产生撞击,有的还在支撑杆上配有弹簧缓冲。

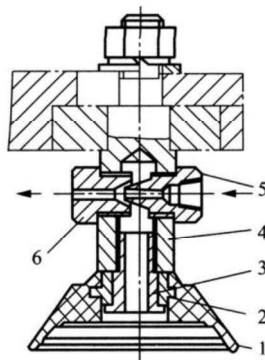


图 17 气流负压式吸盘

1-橡胶吸盘 2-心套 3-通气螺钉 4-支撑杆 5-喷嘴 6-喷嘴套

气流负压吸附取料手是利用流体力学的原理，当需要取物时，压缩空气高速流经喷嘴5时，其出口处的气压低于吸盘腔内的气压，于是腔内的气体被高速气流带走而形成负压，完成取物动作；当需要释放时，切断压缩空气即可。

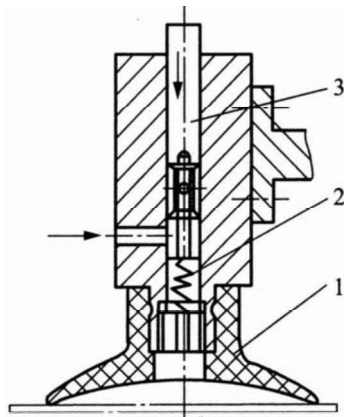


图 18 挤压排气式吸盘

1-橡胶吸盘 2-弹簧 3-拉杆

取料时吸盘压紧物体，橡胶吸盘变形，挤出腔内多余的空气，取料手上升，靠橡胶吸盘的恢复力形成负压，将物体吸住；释放时，压下拉杆3，使吸盘腔与大气相连通而失去负压。

3.5 工业机器人中的传动装置

工业机器人的机械传动装置应用最广泛的是减速器，但与通用的减速器要求有所不同，机器人所用的减速器应具有功率大、传动链短、体积小、质量轻和易于控制等特点。

工业机器人的成本分布

- ◆ 伺服电机：27%
- ◆ 减速机：35%
- ◆ 机械：19%
- ◆ 控制器：16%
- ◆ 其他：3%

目前，高精度减速机、伺服电机和驱动器主要依赖进口，国产工业成本高，无法与国外竞争。

习近平总书记指出：我们不仅要把我国机器人水平提高上去，而且要尽可能多的占领市场。

机器人革命有望成为“第三次工业革命”的一个切入点和重要增长点，将影响全球制造业格局，而且我国将成为全球（数万亿美元）最大的机器人市场。

对于关节型机器人上采用的减速器主要有两类：谐波减速器和RV减速器。

3.5.1 谐波齿轮减速器

(1) 组成

波发生器(H)：柔性轴承内圈固定在椭圆凸轮上，外圈实现弹性变形。

柔轮(R)：带有外齿圈的柔性薄壁弹性体零件，减速器输出端。

钢轮(G)：带有内齿圈的刚性圆环状零件，固定在机体上。

(2) 工作原理

当波发生器连续转动时，迫使柔轮不断产生变形，使两轮轮齿在进行啮入、啮合、啮出、脱开的过程中不断改变各自的工作状态，产生了所谓的错齿运动，从而实现了主动波发生器与柔轮的运动传递。

(3) 特点

传动比大，

传动效率高， $0.92\sim 0.96$

既可做减速器，也可做增速器

承载能力较高：

面接触、多齿啮合

滑动速度小，齿面磨损均匀

齿侧间隙可调，可实现无侧隙高精度啮合

外形轮廓小，零件数目少

寿命长，传动平稳、冲击小

3.5.2 RV 减速器

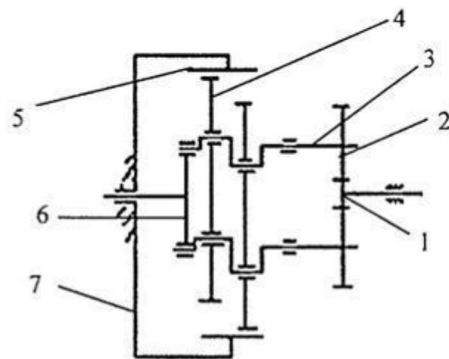


图 19 RV 减速器简图

渐开线中心轮 1：通常为齿轮轴，用来传递输入功率，与渐

开线行星轮互相啮合。

渐开线行星轮 2：它与曲柄轴固联，两个行星轮均匀地分布在一个圆周上，起功率分流的作用。

曲柄轴 3：转臂是摆线轮的旋转轴。它的一端与行星轮相联接，另一端与支撑圆盘相联接。

摆线轮（RV 齿轮）5：为了实现径向力的平衡，一般应采用两个完全相同的摆线轮，分别安装在曲柄轴上且偏心位置相互成 180° 。

针轮 7：针轮与机架固连在一起而成为针轮壳体，在针轮上安装有针齿 5。

教 案

机器人原理及应用 课 8-13 讲

主讲人 王鹏

课题 工业机器人数学基础与运动学

目的任务

1. 理解矩阵在工业机器人中的应用及运算。
2. 理解坐标系在工业机器人中的应用及其关系描述。
3. 理解坐标变换。
4. 掌握机器人运动学逆解（含位置和姿态）的计算。
5. 掌握D-H法与正逆运动学方程。

重点难点

- 重点：1.矩阵、坐标系在工业机器人中的应用
2.坐标变换。
- 难点：1.机器人运动学方程建立；
2. D-H 法与正逆运动学方程

教学方法

开放实验、课堂讲授、课堂互动讨论

使用教具

PPT，工业机器人模型

备课时间

2020年1月31日

上课时间

2020年3月19日

-4月7日

主讲教师（签字）：



课程负责人（签字）：

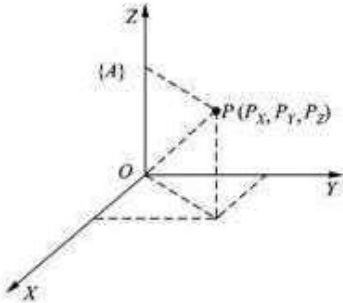


2020年2月24日

教学设计基本方案

授课章节： 第5章 工业机器人的数学基础、第6章 工业机器人运动学	
教学目的及要求： <ol style="list-style-type: none">1. 理解矩阵及运算。2. 理解坐标系及其关系描述。3. 理解坐标变换。4. 掌握机器人运动学逆解（含位置和姿态）的计算。5. 掌握D-H法与正逆运动学方程。6. 理解机器人微分运动与速度	
教学重点： <ol style="list-style-type: none">1. 矩阵及运算。2. 坐标系及其关系描述。3. 坐标变换。4. 机器人运动学逆解（含位置和姿态）的计算。5. D-H法与正逆运动学方程。6. 机器人微分运动与速度	
教学难点： <ol style="list-style-type: none">1. 矩阵及运算。2. 坐标系及其关系描述。3. 坐标变换。4. 机器人运动学逆解（含位置和姿态）的计算。5. D-H法与正逆运动学方程。 <p>结合数据处理软件 Matlab讲解矩阵及其计算。举例并请学生实际解答本章数学习题。强调本章学习的重要性。</p>	
教学步骤及内容：	旁批栏：
一、矩阵及运算	
1. 矩阵	
举例说明	
2. 特殊矩阵	
举例说明	
3. 矩阵运算	

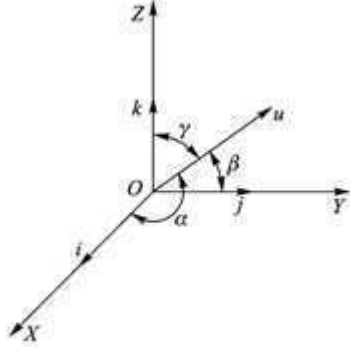
举例说明：矩阵相加/减、重点讲述矩阵相乘、矩阵转置、矩阵求导	引入数学家：早在1955年,J.Denavit和R.S.Hartenberg首次提出了一种采用矩阵代数的方法，即用齐次矩阵(D-H矩阵)来描述机构连杆之间的空间几何关系。
4. 向量——特殊矩阵	
具体举例讲述向量定义、向量的运算（特别要讲述向量之间的点乘叉乘及各自代表的几何意义）、用单位向量描述坐标系方向。	
二、坐标系及其关系描述	
1. 坐标系分类	
举例说明笛卡尔坐标、圆柱坐标、球坐标等参考坐标；工业机器人用坐标	
2. 不同坐标系关系表述	
举例说明同一空间里不同坐标系之间描述。分两种情况：	
1) 共原点	
引入坐标余弦阵，要加深点乘的理解。	
2) 不共原点	
引入位置向量。最终要描述两坐标系在此情况下在空间描述要采用两个矩阵来描述，及位置向量矩阵和坐标余弦阵，但同时还要引入分块矩阵。	
三、坐标变换	
因分析需要，需用几何代数观点来描述物理运动，便产生了坐标变化。	
1. 空间运动物体的坐标描述	
举例讲述：1) 固定坐标系；2) 物体坐标系；3) 空间物体运动种类	
2. 平移变换（物体做直线运动）	
物体直线运动等价于同一空间下物体坐标系相对某一固定坐标系发生平移，即运动物体坐标系在某一固定坐标系下平移，坐标系姿态不改变。数学描述为物体坐标系左乘一个位置坐标列阵。	
2. 坐标旋转	
物体圆周运动等价于同一空间下物体坐标系相对某一固定坐标系发生转动，即运动物体坐标系在某一固定坐标系绕固定坐标系某一个周或三轴同时旋转，但物体坐标系和固定坐标系是共原点的。数学描述：左乘旋转矩阵即可，具体可参见教材。	
四、机器人运动学逆解（含位置和姿态）的计算	
1) 讲解直角坐标系下机器人运动学逆解（含位置和姿态）的计算	
2) 讲解圆柱坐标系下机器人运动学逆解（含位置和姿态）的计算	
3) 讲解球坐标系下机器人运动学逆解（含位置和姿态）的计算	
教学要点：运用矩阵相等定义、逆矩阵、可结合 Matlab 讲解。	
五、D-H 法与正逆运动学方程	
1) 讲解 D-H 法由来	
2) 讲解 D-H 法定义	
3) 讲解 D-H 法求解步骤	
4) 精讲例题	

教学内容	教学设计
<p style="text-align: center;">5 工业机器人数学基础</p> <p>位姿描述</p> <p>5.1 齐次坐标</p> <p>一、空间任意点的坐标表示</p> <p>{</p> <p>在选定的直角坐标系{A}中，空间任一点 P 的位置可以用 ${}^A P$ 的位置矢量表示，其左上标表示选定的坐标系{A}，此时</p> ${}^A P = [P_x P_y P_z]^T$ <p>式中：P_x、P_y、P_z是点 P 在坐标系{A}中的三个位置坐标分量，如图所示。</p> <div style="text-align: center;">  <p>图 空间任一点的坐标表示</p> </div> <p>5.2 齐次坐标表示</p> <p>将一个 n 维空间的点用 $n+1$ 维坐标表示，则该 $n+1$ 维坐标即为 n 维坐标的齐次坐标。一般情况下 w 称为该齐次坐标中的比例因子，当取 $w=1$ 时，其表示方法称为齐次坐标的规格化形式，即</p> $P = [P_x P_y P_z 1]^T$ <p>三、坐标轴的方向表示</p> <p>i、j、k 分别表示直角坐标系中 X、Y、Z 坐标轴的单位矢量，用齐次坐标表示之，则有</p> $X = [1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ <p>—</p> $Y = [0 \ 1 \ 0 \ 0]^T$ $Z = [0 \ 0 \ 1 \ 0]^T$ <p>由上述可知，若规定：41 列阵 $[abcw]^T$ 中第四个元素为零，且满足 $a^2+b^2+c^2=1$，则 $[abc0]^T$ 中 a、b、c 的表示某轴的方向；41 列阵 $[abcw]^T$ 中第四个元素不为零，则 $[abcw]^T$ 表示空间某点的位置。</p> <p>四、矢量的方向表示</p> <p>图中所示的矢量 u 的方向用 41 列阵可表达为：</p> $u = [abc0]^T$	<p>举例：板书绘制坐标系，进行坐标描述</p>

$$a=\cos, b=\cos, c=\cos$$

图中所示的矢量 u 的起点 O 为坐标原点, 用 41 列阵可表达为:

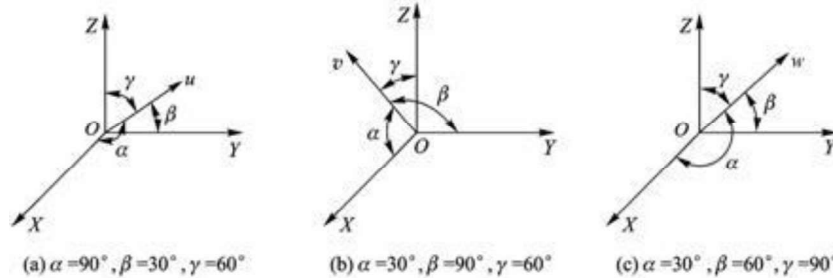
$$O=[0001]^T$$



图坐标轴及矢量的方向表示

举例: 板书绘制坐标系, 进行矢量方向描述

例用齐次坐标表示图中所示的矢量 u 、 v 、 w 的坐标方向。图用不同方向角表示方向矢量 u 、 v 、 w



5.1.2 位姿描述

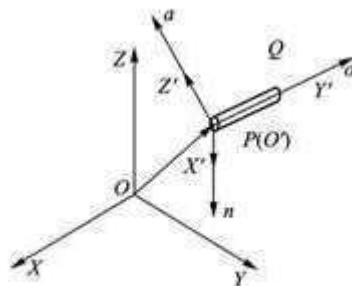
在机器人坐标系中, 运动时相对于连杆不动的坐标系称为静坐标系, 简称静系; 跟随连杆运动的坐标系称为动坐标系, 简称为动系。动系位置与姿态的描述称为动系的位姿表示, 是对动系原点位置及各坐标轴方向的描述。

一、连杆的位姿描述

设有一个机器人的连杆, 若给定了连杆 PQ 上某点的位置和该连杆在空间的姿态, 则称该连杆在空间是完全确定的。

如图所示, O 为连杆上任一点, $OXYZ$ 为与连杆固接的一个动坐标系, 即为动系。连杆 PQ 在固定坐标系 $OXYZ$ 中的位置可用一齐次坐标表示为

$$P=[X_0 \ Y_0 \ Z_0 \ 1]^T$$



举例: 板书绘制坐标系, 进行连杆位姿描述

连杆的姿态可由动系的坐标轴方向来表示。令 \mathbf{n} 、 \mathbf{o} 、 \mathbf{a} 分别为 X 、 Y 、 Z 坐标轴的单位矢量，各单位方向矢量在静系上的分量为动系各坐标轴的方向余弦，以齐次坐标形式分别表示为

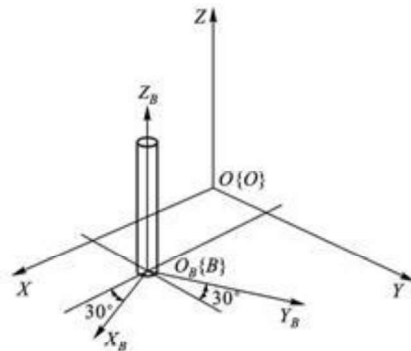
$$\left. \begin{aligned} \mathbf{n} &= [n_X \ n_Y \ n_Z \ 0]^T \\ \mathbf{o} &= [o_X \ o_Y \ o_Z \ 0]^T \\ \mathbf{a} &= [a_X \ a_Y \ a_Z \ 0]^T \end{aligned} \right\}$$

由此可知，连杆的位姿可用下述齐次矩阵表示：

$$\mathbf{d} = [\mathbf{n} \ \mathbf{o} \ \mathbf{a} \ \mathbf{P}] = \begin{bmatrix} n_X & o_X & a_X & X_0 \\ n_Y & o_Y & a_Y & Y_0 \\ n_Z & o_Z & a_Z & Z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

显然，连杆的位姿表示就是对固连于连杆上的动系位姿表示。

例图表示固连于连杆的坐标系 $\{B\}$ 位于 O_B 点， $X_B=2$ ， $Y_B=1$ ， $Z_B=0$ 。在 XOY 平面内，坐标系 $\{B\}$ 相对固定坐标系 $\{A\}$ 有一个 30° 的偏转，试写出表示连杆位姿的坐标系 $\{B\}$ 的 44 矩阵表达式。

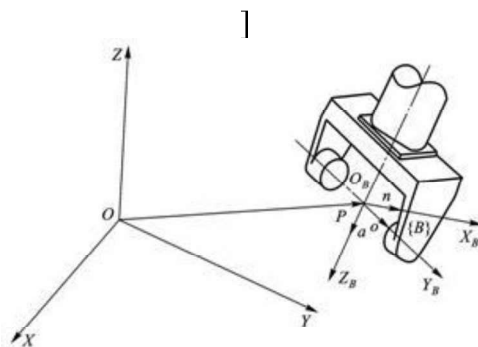


图动坐标系 $\{B\}$ 的位姿表示

二、手部的位姿描述

机器人手部的位姿也可以用固连于手部的坐标系 $\{B\}$ 的位姿来表示，如图所示。坐标系 $\{B\}$ 可以这样来确定；取手部的中心点为原点 O_B ；关节轴为 Z_B 轴， Z_B 轴的单位方向矢量 \mathbf{a} 称为接近矢量，指向朝外；两手指的连线为 Y_B 轴， Y_B 轴的单位方向矢量 \mathbf{o} 称为姿态矢量，指向可任意选定； X_B 轴与 Y_B 轴及 Z_B 轴垂直， X_B 轴的单位方向矢量 \mathbf{n} 称为法向矢量，且 $\mathbf{n}=\mathbf{o}\mathbf{a}$ ，指向符合右手法则。

举例：板书绘制坐标系，进行手部坐标系的位姿描述



手部的位姿表示

手部的位置矢量为固定参考系原点指向手部坐标系{B}原点的矢量 P ，手部的方向矢量为 n 、 o 、 a 。于是手部的位姿可用 44 矩阵表示为

$$T = [n \quad o \quad a \quad P] = \begin{bmatrix} n_X & o_X & a_X & P_X \\ n_Y & o_Y & a_Y & P_Y \\ n_Z & o_Z & a_Z & P_Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

例图表示手部抓握物体 Q，物体是边长为 2 个单位的正立方体，写出表达该手部位姿的矩阵表达式。

三、目标物齐次矩阵表示

如图所示，楔块 Q 在图(a)所示位置，其位置和姿态可用 8 个点描述，矩阵表达式为

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 2 & 2 & 0 & 0 & 2 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

若让楔块绕 Z 轴旋转 -90° ，用 $Rot(Z, -90^\circ)$ 表示，再沿 X 轴方向平移 4，用 $Trans(4, 0, 0)$ 表示，则楔块成为图(b)所示的情况。此时楔块用新的 8 个点来描述它的位置和姿态，其矩阵表达式为

$$Q' = \begin{bmatrix} 4 & 4 & 6 & 6 & 4 & 4 & 6 & 6 \\ -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

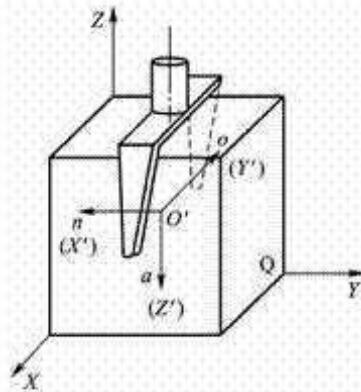
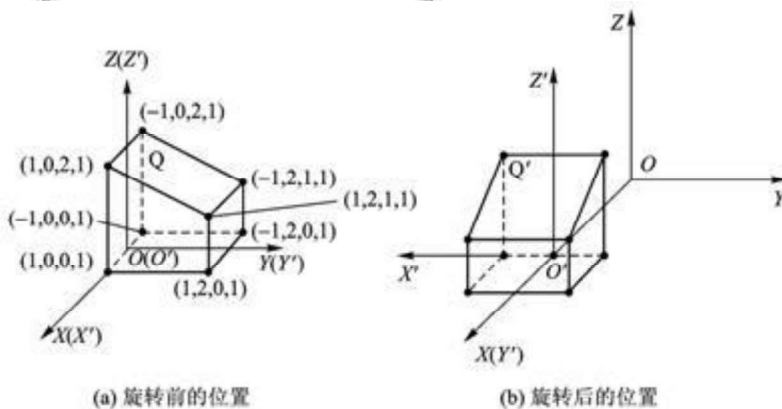


图 抓握物体 Q 的手部



图楔块 Q 的齐次矩阵表示

6 工业机器人运动学

6.1 工业机器人的连杆参数和齐次变换矩阵

1. 连杆参数及连杆坐标系的建立

工业机器人相邻连杆之间的关系，与连杆自身的特征和连杆之间的连接方式有关。因此，我们首先应该清楚如何对连杆的特征和连接方式进行描述。

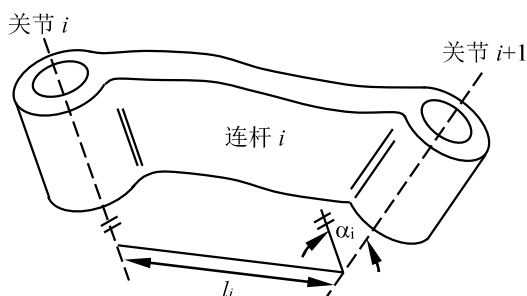


图 2.35 连杆尺寸参数 l_i 及 α_i

1) 连杆特征的描述

如图 2.35 所示，连杆 i 两端有关节 i 和 $i+1$ 。该连杆的特征可以用两个参数来描述：一个是两个关节轴线沿公垂线的距离 l_i ，称为连杆长度；另一个是在垂直于公垂线的平面内两个轴线的夹角 α_i ，称为连杆扭角。这两个参数为表述连杆特征的尺寸参数。连杆长度 l_i 恒为非负数，但连杆扭角 α_i 可正、可负。 α_i 的正负是这样规定的：公垂线的正向规定为从关节 i 指向关节 $i+1$ ，按右手法则从轴线 i 绕公垂线转至轴线 $i+1$ ，逆时针为正，顺时针为负。两轴线平行时， $\alpha_i=0$ ；两轴线相交时， $l_i=0$ ，此时扭角 α_i 为两轴线的夹角，正负与 X_i 轴选向有关。

2) 连杆连接方式的描述

如图 2.36 所示，连杆 i 与连杆 $i-1$ 通过关节 i 相连，因此，关节 i 的轴线有两条公垂线与它垂直。两条公垂线的相对位置可用两个参数 d_i 和 θ_i 来确定，其中 d_i 是沿关节 i 轴线测量的两个公垂线与 i 轴线交点的距离，当关节轴线相交时， d_i 为 i 轴线上两交点的距离； θ_i 是在关节 i 轴线的垂直平面内两个公垂线的夹角，当公垂线不存在时，对旋转关节 θ_i 仍然存在。 d_i 和 θ_i 是表达相邻连杆连接关系的参数。 d_i 和 θ_i 都可正、可负(详见表 2.8)。

这样，相邻两个连杆之间的关系可以由四个参数所描述：其中两个参数 (l_i 和 α_i) 描述连杆 i 的尺寸；另外两个参数 (d_i 和 θ_i) 描述连杆 i 和连杆 $i-1$ 之间的连接关系。对于旋转关节， θ_i 是关节变量，其它三个参数固定不变；对于移动关节， d_i 是关节变量，其它三个参数固定不变。(对照图 2.36 解释，一个关节即为一个自由度)

3) 连杆坐标系的建立

D-H 法要求按下面规则建立连杆 i 的坐标系 $\{i\}$ (简称 i 系)：

举例：结合前面所学知识对工业机器人某一部件进行描述

- 1) 坐标系 $\{i\}$ 与连杆 i 固连。 Z_i 轴与关节 $i+1$ 的轴线重合，指向任意；
- 2) X_i 轴与连杆 i 的两个关节轴线的公垂线重合，方向从关节 i 指向关节 $i+1$ 。当 $l_i=0$ 时，取 $X_i = \pm Z_{i-1} \times Z_i$ ，但 X_i 轴取向影响 α_i 正负（图 2.35）；
- 3) 坐标系 $\{i\}$ 的 Y_i 轴按右手法则规定，即 $Y_i = Z_i \times X_i$ ；
- 4) 坐标系 $\{i\}$ 的原点 O_i 取在 X_i 和 Z_i 的交点上。当关节 i 的轴线与关节 $i+1$ 的轴线相交时，原点 O_i 取在两轴线的交点上；当关节 i 的轴线与关节 $i+1$ 的轴线平行时，原点 O_i 取在使 $d_i=0$ 的地方。（对照图 2.36 解释）

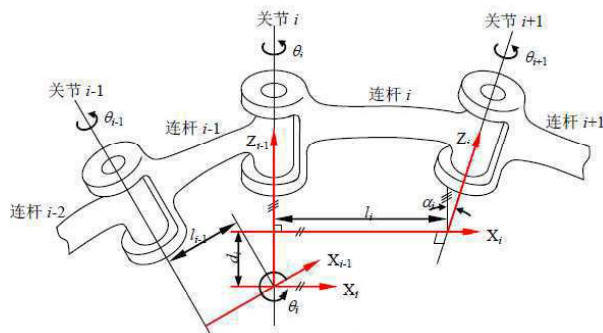


图 2.36 连杆关系参数

图 2.36 画出了坐标系 $\{i-1\}$ 和 $\{i\}$ 的设定位姿。

在建立连杆坐标系时，下面四点值得注意：

- 1) 连杆坐标系的建立不是唯一的。例如，虽然 Z_i 轴与关节 $i+1$ 的轴线重合，但 Z_i 轴的指向有两种选择；当 Z_i 轴与 Z_{i-1} 轴相交时， X_i 轴的指向也有两种选择；
- 2) 坐标系 $\{i\}$ 也可以建立在关节 i 的轴线上，并使 Z_i 轴与关节 i 的轴线重合；
- 3) 建立不同的连杆坐标系，相应的连杆参数将会不同。应使描述连杆 i 的四个参数中尽可能多地为零；
- 4) 与机座固连的 $\{0\}$ 系原则上可以任意规定，但是，为了方便计算，一般应将 $\{0\}$ 系建立在连杆 1 的关节 1 的轴线上，并使 $\{0\}$ 系与 $\{1\}$ 系尽量靠近或重合（画极坐标型）。

现将连杆参数与坐标系的建立归纳为表 2.8。

表 2.8 连杆参数及坐标系

连杆 i 的参数		
含义	正负号	性质
X_{i-1} 轴绕 Z_{i-1} 轴转至与 X_i 轴平行时的转角	按右手法则确定	转动关节为变量 移动关节为常量
X_{i-1} 轴沿 Z_{i-1} 方向移动至与 X_i 轴相交时发生的位移	与 Z_{i-1} 正向一致为正	转动关节为常量 移动关节为变量
Z_{i-1} 轴沿 X_i 方向移动至与 Z_i 轴相交时移动的距离	恒为非负数	常量
Z_{i-1} 轴绕 X_i 轴转至与 Z_i 轴平行时的转角	按右手法则确定	常量
连杆 i 的坐标系 $O_i X_i Y_i Z_i$		

	原点 O_i	坐标轴 Z_i	坐标轴 X_i	坐标轴 Y_i
位于连杆 i 与关节 $i+1$ 轴线的交点处	两关节轴线之公垂线	与关节 $i+1$ 的轴线重合, 方向任意确定	沿连杆 i 两关节轴线的公垂线, 并指向 $i+1$ 关节	按右手法则确定

2. 连杆坐标系之间的变换矩阵

建立了各连杆的坐标系后, $i-1$ 系和 i 系之间的变换关系可以用坐标系的平移、旋转来实现。从 $i-1$ 系到 i 系得变换步骤如下:

(1) 令 $i-1$ 系绕 Z_{i-1} 轴旋转 θ_i 角, 使 X_{i-1} 与 X_i 平行, 算子为 $\text{Rot}(z, \theta_i)$ 。

(2) 沿 Z_{i-1} 轴平移 d_i , 使 X_{i-1} 与 X_i 重合, 算子为 $\text{Trans}(0,0, d_i)$ 。

(3) 沿 X_i 轴平移 l_i , 使两个坐标系原点重合, 算子为 $\text{Trans}(l_i,0,0)$ 。

(4) 绕 X_i 轴旋转 α_i 角, 使得 $i-1$ 系和 i 系重合, 算子为 $\text{Rot}(x, \alpha_i)$ 。

用一个变换矩阵 A_i 来综合表示上述四次变换时, 应注意原来的 i 系在每次旋转或平移后发生了变动, 后一次变换是相对动坐标系进行的, 因此, 在运算中变换算子应该右乘。

于是, 连杆 i 的齐次变换矩阵为:

$$A_i = \text{Rot}(z, \theta_i) \cdot \text{Trans}(0, 0, d_i) \cdot \text{Trans}(l_i, 0, 0) \cdot \text{Rot}(x, \alpha_i)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & 0 \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_i & -\sin \alpha_i & 0 \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & l_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & l_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-35)$$

实际上, 很多工业机器人在设计时, 常常使某些连杆参数取特殊值, 如使 $\alpha_i=0^\circ$ 或 90° , 也有使 $l_i=0$ 或 $d_i=0$, 从而可以简化变换矩阵 A_i 的计算, 同时也可以简化控制。

6.2 工业机器人的运动学方程

1. 机器人运动学方程

我们将为机器人的每一个连杆建立一个坐标系, 并用其次变换来描述这些坐标系间的相对关系, 也叫相对位姿。通常把描述一个连杆坐标系与下一个连杆坐标系间的相对关系的变换矩阵叫做 A_i 变换矩阵。 A_i 能描述连杆坐标系之间相对平移和旋转的齐次变换。

A_1 描述第一个连杆对于机身的位姿, A_2 描述第二个连杆坐标系相对于第一个连杆坐标系的位姿。如果已知一点在最末一个坐标系(如 n 坐标系)的坐标, 要把它表示成前一个坐标系(如 $n-1$)的坐标, 那么齐次坐标变换矩阵为 A_n 。依此类

推，可知此点到基础坐标系的齐次坐标变换矩阵为：

$$A_1 A_2 A_3 \cdots A_{n-1} A_n \quad (2-36)$$

若有一个六连杆机器人，机器人末端执行器坐标系(即连杆坐标系 6)的坐标相对于连杆 $i-1$ 坐标系的齐次变换矩阵，用 ${}^{i-1}T_6$ 表示，即

$${}^{i-1}T_6 = A_i A_{i+1} \cdots A_6 \quad (2-37)$$

机器人末端执行器相对于机身坐标系的齐次变换矩阵为

$${}^0T_6 = A_1 A_2 \cdots A_6 \quad (2-38)$$

式中： 0T_6 常写成 T_6 。

该矩阵前三列表示手部的姿态；第四列表示手部中心点的位置。可写成如下形式：

$$T_n = [\mathbf{n} \quad \mathbf{o} \quad \mathbf{a} \quad \mathbf{p}] = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-39)$$

事实上，很多工业机器人在设计时，常常使某些连杆参数取特殊值，使得连杆坐标系比较容易建立，同时，相邻两个连杆坐标系之间的变换矩阵 A_i 也比容易获得。下面通过两个实例来介绍建立工业机器人运动学方程的方法。

2. 正向运动学及实例

正向运动学主要解决机器人运动学方程的建立及手部位姿的求解，即已知各个关节的变量，求手部的位姿。

1) SCARA 型机器人的运动学方程

如图 2.37 所示，SCARA 装配机器人具有一个肩关节、一个肘关节和一个腕关节，共 3 自由度。考虑到关节轴线相互平行，并且连杆都在一个平面内的特点，将固定坐标系 $\{0\}$ 和连杆 1、连杆 2、连杆 3 的坐标系 $\{1\}$ 、 $\{2\}$ 、 $\{3\}$ 分别建立在关节 1、关节 2、关节 3 和手部的中心，如图 2.37 (a) 所示。坐标系 $\{3\}$ 就是手部坐标系。连杆参数中 θ 为变量， d 、 l 、 α 均为常量。建立了连杆坐标系之后，即可列出该工业机器人的连杆参数如表 2.9 所示。

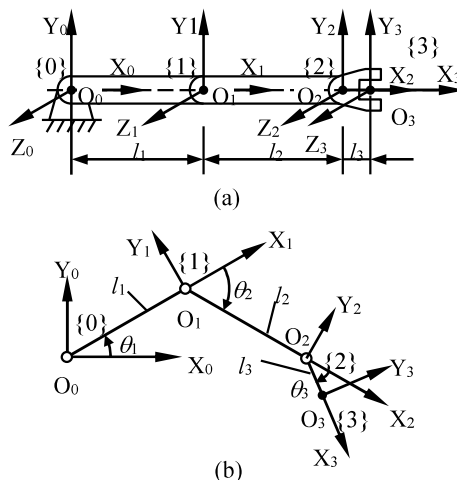


图 2.37 SCARA 型机器人的坐标系

表 2.9 SCARA 工业机器人的连杆参数

连杆	转角 θ	两连杆之间距离 d	连杆长度 l	连杆扭角 α
连杆 1	θ_1	$d_1=0$	$l_1=100$	$\alpha_1=0$
连杆 2	θ_2	$d_2=0$	$l_2=100$	$\alpha_2=0$
连杆 3	θ_3	$d_3=0$	$l_3=20$	$\alpha_3=0$

该 SCARA 型工业机器人的运动学方程为：

$$\mathbf{T}_3 = \mathbf{A}_1 \mathbf{A}_2 \mathbf{A}_3$$

式中， \mathbf{A}_i ($i=1, 2, 3$) 表示坐标系 $\{i\}$ 相对于坐标系 $\{i-1\}$ 的齐次变换矩阵。

把表 2.9 中每一行的参数代入公式(2-35)中，即可得出齐次变换矩阵 \mathbf{A}_1 、 \mathbf{A}_2 和 \mathbf{A}_3 。因为该 SCARA 型工业机器人的各连杆之间的关系比较简单，可以参考图 2.37 (b)直接写出矩阵 \mathbf{A}_1 、 \mathbf{A}_2 和 \mathbf{A}_3 。

我们以 \mathbf{A}_1 为例说明其计算方法。 $\{1\}$ 系的运动过程是：先沿 X_0 移动 l_1 ，再绕 Z_0 转动 θ_1 ，因为转动是相对固定坐标系进行的，所以， $\text{Rot}(z, \theta_1)$ 应该左乘 $\text{Trans}(l_1, 0, 0)$ 。因此， \mathbf{A}_1 、 \mathbf{A}_2 和 \mathbf{A}_3 分别为：

$$\mathbf{A}_1 = \text{Rot}(z, \theta_1) \cdot \text{Trans}(l_1, 0, 0)$$

$$\mathbf{A}_2 = \text{Rot}(z, \theta_2) \cdot \text{Trans}(l_2, 0, 0)$$

$$\mathbf{A}_3 = \text{Rot}(z, \theta_3) \cdot \text{Trans}(l_3, 0, 0)$$

即：

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} c\theta_1 & -s\theta_1 & 0 & 0 \\ s\theta_1 & c\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\theta_1 & -s\theta_1 & 0 & l_1 c\theta_1 \\ s\theta_1 & c\theta_1 & 0 & l_1 s\theta_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} c\theta_2 & -s\theta_2 & 0 & 0 \\ s\theta_2 & c\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\theta_2 & -s\theta_2 & 0 & l_2 c\theta_2 \\ s\theta_2 & c\theta_2 & 0 & l_2 s\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}_3 = \begin{bmatrix} c\theta_3 & -s\theta_3 & 0 & 0 \\ s\theta_3 & c\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\theta_3 & -s\theta_3 & 0 & l_3 c\theta_3 \\ s\theta_3 & c\theta_3 & 0 & l_3 s\theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

因此，可以写出

$$\mathbf{T}_3 = \mathbf{A}_1 \mathbf{A}_2 \mathbf{A}_3 = \begin{bmatrix} c_{123} & -s_{123} & 0 & l_3 c_{123} + l_2 c_{12} + l_1 c_1 \\ s_{123} & c_{123} & 0 & l_3 s_{123} + l_2 s_{12} + l_1 s_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-40)$$

式中： $c_{123} = \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)$ ； $s_{123} = \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)$ ； $c_{12} =$

$\cos(\theta_1+\theta_2)$; $s_{12}=\sin(\theta_1+\theta_2)$; $c_1=\cos\theta_1$; $s_1=\sin\theta_1$ 。(在以后的叙述中, \cos 可用 c 表示, \sin 可用 s 表示。)

T_3 表示手部坐标系 {3} (即手部) 在固定坐标系中的位置和姿态。

式(2-40)即为图 2.37(a)所示的 SCARA 型机器人的正向运动学方程。

当 l_1 、 l_2 、 l_3 和转角变量 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 给定时, 可以根据式(2-40)算出 T_3 的具体数值。如图 2.37(b)所示, 设 $l_1=l_2=100$, $l_3=20$; $\theta_1=30^\circ$, $\theta_2=-60^\circ$, $\theta_3=-30^\circ$, 则可以根据式(2-40)求出手部的位姿矩阵表达式为:

$$T_3 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.866 & 0 & 183.2 \\ -0.866 & 0.5 & 0 & -17.32 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

2) 斯坦福工业机器人的运动学方程

图 2.38 为斯坦福工业机器人简图及研究人员赋给各连杆的坐标系。表 2.10 是研究人员根据设定的坐标系得出的斯坦福工业机器人各连杆的参数。把表 2.10 中每一行的参数代入公式(2-35)中, 即可得出齐次变换矩阵 $A_1 \sim A_6$ 。

表 2.10 斯坦福工业机器人连杆参数

杆号	关节转角 θ	扭角 α	杆长 l	距离 d
1	θ_1	-90°	0	0
2	θ_2	90°	0	d_2
3	0	0°	0	d_3
4	θ_4	-90°	0	0
5	θ_5	90°	0	0
6	θ_6	0°	0	H

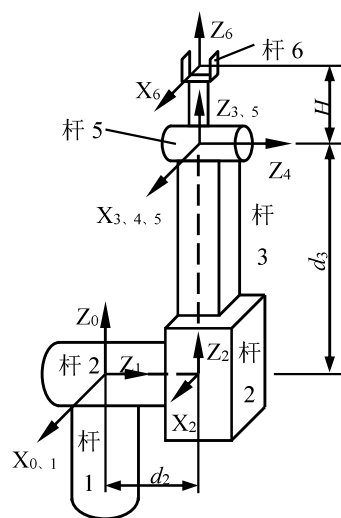


图 2.38a 斯坦福机器人及连杆坐标系

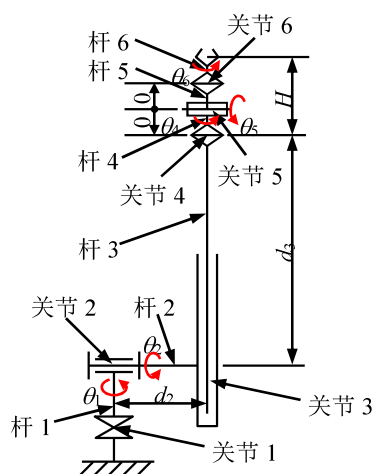


图 2.38b 斯坦福机器人机构简图

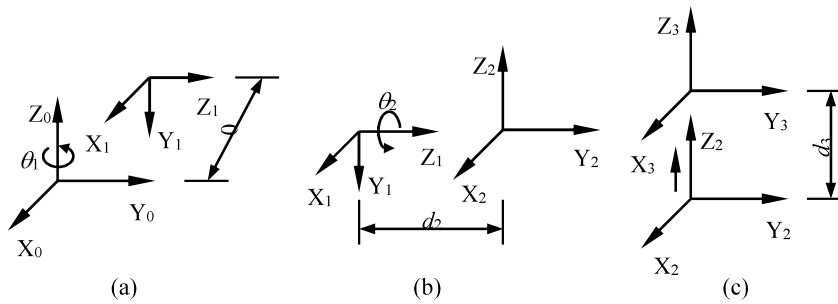


图 2.39 斯坦福机器人手臂坐标系之间的关系

{1}系与{0}系是旋转关节连接，如图 2.39(a)所示。{1}系相对于{0}系的变换过程是：{1}系统{0}系的 X_0 轴作 $\alpha_1 = -90^\circ$ 的旋转，然后{1}系统{0}系的 Z_0 作变量 θ_1 的旋转，所以：

$$\mathbf{A}_1 = \text{Rot}(z, \theta_1)\text{Rot}(x, \alpha_1) = \text{Rot}(z, \theta_1)\text{Rot}(x, -90^\circ)$$

$$= \begin{bmatrix} c\theta_1 & -s\theta_1 & 0 & 0 \\ s\theta_1 & c\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\theta_1 & 0 & -s\theta_1 & 0 \\ s\theta_1 & 0 & c\theta_1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-41)$$

{2}系与{1}系是旋转关节连接，连杆距离为 d_2 ，如图 2.39 (b)所示。{2}系相对于{1}系的变换过程是：{2}系统{1}系的 X_1 轴作 $\alpha_2 = 90^\circ$ 的旋转，然后{2}系沿着{1}系的 Z_1 轴正向作 d_2 距离的平移，再绕{1}系的 Z_1 轴作变量 θ_2 的旋转，所以：

$$\mathbf{A}_2 = \text{Rot}(z, \theta_2)\text{Trans}(0, 0, d_2)\text{Rot}(x, \alpha_2) = \text{Screw}(z, d_2, \theta_2)\text{Rot}(x, 90^\circ)$$

$$= \begin{bmatrix} c\theta_2 & -s\theta_2 & 0 & 0 \\ s\theta_2 & c\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\theta_2 & 0 & s\theta_2 & 0 \\ s\theta_2 & 0 & -c\theta_2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-42)$$

{3}系与{2}系是移动关节连接，如图 2.39 (c)所示。坐标系{3}沿着坐标系{2}的 Z_2 轴正向作变量 d_3 的平移。所以：

$$\mathbf{A}_3 = \text{Trans}(0, 0, d_3) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-43)$$

图 2.40 是斯坦福工业机器人手腕三个关节的示意图，它们都是转动关节，关节变量为 θ_4 ， θ_5 及 θ_6 ，并且三个关节的中心重合。下面根据图 2.41 所示手腕坐标系之间的关系写出齐次变换矩阵 $\mathbf{A}_4 \sim \mathbf{A}_6$ 。

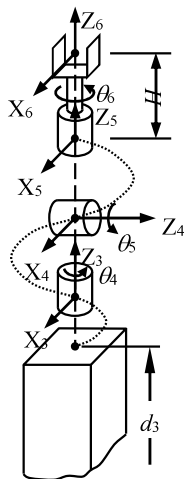


图 2.40 斯坦福机器人手腕

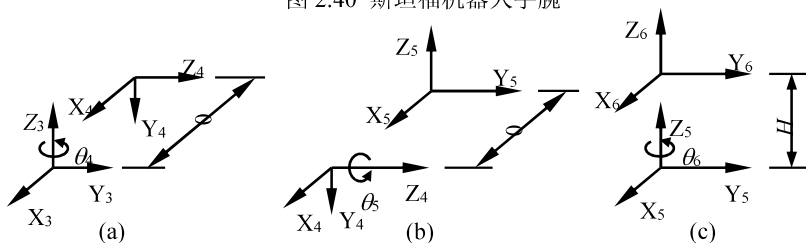


图 2.41 斯坦福机器人手腕坐标系之间的关系

如图 2.40 (a)所示, {4}系相对于{3}系的变换过程是: {4}系绕{3}系的 X_3 轴作 $\alpha_4 = -90^\circ$ 的旋转, 然后绕{3}系的 Z_3 轴作变量 θ_4 的旋转, 所以:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{A}_4 &= \text{Rot}(z, \theta_4)\text{Rot}(x, \alpha_4) = \text{Rot}(z, \theta_4)\text{Rot}(x, -90^\circ) \\
 &= \begin{bmatrix} c\theta_4 & -s\theta_4 & 0 & 0 \\ s\theta_4 & c\theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\theta_4 & 0 & -s\theta_4 & 0 \\ s\theta_4 & 0 & c\theta_4 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned}
 \tag{2-44}$$

如图 2.40 (b)所示, {5}系相对于{4}系的变换过程是: {5}系绕{4}系的 X_4 轴作 $\alpha_5 = 90^\circ$ 的旋转, 然后绕{4}系的 Z_4 轴作变量 θ_5 的旋转, 所以:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{A}_5 &= \text{Rot}(z, \theta_5)\text{Rot}(x, \alpha_5) = \text{Rot}(z, \theta_5)\text{Rot}(x, 90^\circ) \\
 &= \begin{bmatrix} c\theta_5 & -s\theta_5 & 0 & 0 \\ s\theta_5 & c\theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\theta_5 & 0 & s\theta_5 & 0 \\ s\theta_5 & 0 & -c\theta_5 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned}
 \tag{2-45}$$

如图 2.40 (c)所示, {6}系沿着{5}系的 Z_5 轴作距离 H 的平移, 并绕{5}系的 Z_5 轴作变量 θ_6 的旋转, 所以:

$$\mathbf{A}_6 = \text{Screw}(z, H, \theta_6) = \begin{bmatrix} c\theta_6 & -s\theta_6 & 0 & 0 \\ s\theta_6 & c\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & H \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-46)$$

这样，所有杆的 \mathbf{A} 矩阵已建立。如果要知道非相邻连杆间的关系，只要用相应的 \mathbf{A} 矩阵连乘即可。如：

$${}^4\mathbf{T}_6 = \mathbf{A}_5\mathbf{A}_6 = \begin{bmatrix} c\theta_5c\theta_6 & -c\theta_5s\theta_6 & s\theta_5 & Hs\theta_5 \\ s\theta_5c\theta_6 & -s\theta_5s\theta_6 & -c\theta_5 & Hc\theta_5 \\ s\theta_6 & c\theta_6 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

同理可得：

$${}^3\mathbf{T}_6 = \mathbf{A}_4\mathbf{A}_5\mathbf{A}_6$$

$${}^2\mathbf{T}_6 = \mathbf{A}_3\mathbf{A}_4\mathbf{A}_5\mathbf{A}_6$$

$${}^1\mathbf{T}_6 = \mathbf{A}_2\mathbf{A}_3\mathbf{A}_4\mathbf{A}_5\mathbf{A}_6$$

斯坦福工业机器人运动学方程为：

$${}^0\mathbf{T}_6 = \mathbf{A}_1\mathbf{A}_2\mathbf{A}_3\mathbf{A}_4\mathbf{A}_5\mathbf{A}_6 \quad (2-47)$$

方程(2-47)右边的结果就是最后一个坐标系——手部坐标系{6}相对于固定坐标系{0}的位置和姿态矩阵，各元素均为 θ_i 和 d_i ($i=1, 2, \dots, 6$) 的函数。当 θ_i 和 d_i 给出后，可以计算出斯坦福工业机器人手部坐标系{6}的位置 \mathbf{p} 和姿态 \mathbf{n} 、 \mathbf{o} 、 \mathbf{a} 。这就是斯坦福工业机器人手部位姿的解，这个求解过程叫做斯坦福工业机器人运动学正解。

6.3 反向运动学及实例

反向运动学解决的问题是：已知手部的位姿，求各个关节的变量。在机器人的控制中，往往已知手部到达的目标位姿，需要求出关节变量，以驱动各关节的电机，使手部的位姿得到满足，这就是运动学的反向问题，也称逆运动学。

现以斯坦福工业机器人为例来介绍反向求解的一种方法。为了书写简便，假设 $H=0$ ，即坐标系{6}与坐标系{5}原点相重合。

已知斯坦福工业机器人的运动学方程为：

$$\mathbf{T}_6 = \mathbf{A}_1\mathbf{A}_2\mathbf{A}_3\mathbf{A}_4\mathbf{A}_5\mathbf{A}_6$$

现在给出 \mathbf{T}_6 矩阵及各杆的参数 l, α, d ，求关节变量 $\theta_1 \sim \theta_6$ ，其中 $\theta_3 = d_3$ 。

(1) 求 θ_1

用 \mathbf{A}_1^{-1} 左乘式(2-47)，得：

$${}^1\mathbf{T}_6 = \mathbf{A}_1^{-1}\mathbf{T}_6 = \mathbf{A}_2\mathbf{A}_3\mathbf{A}_4\mathbf{A}_5\mathbf{A}_6$$

将上式左右两边展开得：

$$= \begin{bmatrix} n_x c_1 + n_y s_1 & o_x c_1 + o_y s_1 & a_x c_1 + a_y s_1 & p_x c_1 + p_y s_1 \\ -n_z & -o_z & -a_z & -p_z \\ -n_x s_1 + n_y c_1 & -o_x s_1 + o_y c_1 & -a_x s_1 + a_y c_1 & -p_x s_1 + p_y c_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} c_2(c_4 c_5 c_6 - s_4 s_6) - s_2 s_5 c_6 & -c_2(c_4 c_5 s_6 + s_4 c_6) + s_2 s_5 s_6 & c_2 c_4 s_5 + s_2 c_5 & s_2 d_3 \\ s_2(c_4 c_5 c_6 - s_4 s_6) + c_2 s_5 c_6 & -s_2(c_4 c_5 s_6 + s_4 c_6) - c_2 s_5 s_6 & s_2 c_4 s_5 - c_2 c_5 & c_2 d_3 \\ s_4 c_5 c_6 + c_4 s_6 & -s_4 c_5 s_6 + c_4 s_6 & s_4 s_5 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-48)$$

根据式(2-48)左、右两边之第三行第四列元素相等可得：
 $-p_x s_1 + p_y c_1 = d_2$

(2-49)

引入中间变量 r 及 ϕ , 令

$$\begin{aligned} p_x &= r \cdot \cos \phi \\ p_y &= r \cdot \sin \phi \\ r &= \sqrt{p_x^2 + p_y^2} \\ \phi &= \arctan \frac{p_y}{p_x} \end{aligned}$$

则式(2-49)化为：

$$\cos \theta_1 \sin \phi - \sin \theta_1 \cos \phi = \frac{d_2}{r}$$

利用和差公式，上式又可化为：

$$\sin(\phi - \theta_1) = \frac{d_2}{r}$$

这里， $0 < \frac{d_2}{r} \leq 1$ ， $0 < \phi - \theta_1 < \pi$ ，又因为：

$$\cos(\phi - \theta_1) = \pm \sqrt{1 - (d_2/r)^2}$$

故有：

$$\phi - \theta_1 = \pm \arctan \left(\frac{d_2/r}{\sqrt{1 - (d_2/r)^2}} \right) = \pm \arctan \left(\frac{d_2}{\sqrt{r^2 - d_2^2}} \right)$$

所以：

$$\theta_1 = \arctan \left(\frac{p_y}{p_x} \right) \mp \arctan \left(\frac{d_2}{\sqrt{r^2 - d_2^2}} \right) \quad (2-50)$$

这里，“+”号对应右肩位姿，“-”号对应左肩位姿。

(2) 求 θ_2

根据式(2-48)左、右两边第一行第四列相等和第二行第四列相等可得：

$$\begin{cases} p_x c_1 + p_y s_1 = s_2 d_3 \\ -p_z = -c_2 d_3 \end{cases} \quad (2-51)$$

故：

$$\theta_2 = \arctan\left(\frac{p_x c_1 + p_y s_1}{p_z}\right) \quad (2-52)$$

(3) 求 θ_3

在斯坦福工业机器人中 $\theta_3 = d_3$ ，利用 $\sin^2\theta + \cos^2\theta = 1$ ，由式(2-51)可解得：

$$d_3 = s_2(p_x c_1 + p_y s_1) + p_z c_2 \quad (2-53)$$

(4) 求 θ_4

由于 ${}^3T_6 = A_4 A_5 A_6$ ，所以：

$$A_4^{-1} \cdot {}^3T_6 = A_5 A_6 \quad (2-54)$$

将式(2-54)左、右两边展开后取其左、右两边第三行第三列相等，得：

$$-s_4 [c_2(a_x c_1 + a_y s_1) - a_z s_2] + c_4 (-a_x s_1 + a_y c_1) = 0$$

所以：

$$\theta_4 = \arctan\left(\frac{-a_x s_1 + a_y c_1}{c_2(a_x c_1 + a_y s_1) - a_z s_2}\right)$$

$$\text{及} \quad \theta_4 = \theta_4 + 180^\circ \quad (2-55)$$

(5) 求 θ_5

取式(2-54)展开式左、右两边第一行第三列相等及第二行第三列相等，有：

$$\begin{cases} c_4 [c_2(a_x c_1 + a_y s_1) - a_z s_2] + s_4 (-a_x s_1 + a_y c_1) = s_5 \\ s_2(a_x c_1 + a_y s_1) + a_z c_2 = c_5 \end{cases}$$

所以：

$$\theta_5 = \arctan\left(\frac{c_4 [c_2(a_x c_1 + a_y s_1) - a_z s_2] + s_4 (-a_x s_1 + a_y c_1)}{s_2(a_x c_1 + a_y s_1) + a_z c_2}\right) \quad (2-56)$$

(6) 求 θ_6

采用下列方程：

$$A_5^{-1} \cdot {}^4T_6 = A_6 \quad (2-57)$$

展开并取其左、右两边第一行第二列相等及第二行第二列相等，有：

$$\begin{cases} s_6 = -c_5 \{c_4 [c_2(o_x c_1 + o_y s_1) - o_z s_2] + s_4 (-o_x s_1 + o_y c_1)\} + s_5 [s_2(o_x c_1 + o_y s_1) + o_z c_2] \\ c_6 = -s_4 [c_2(o_x c_1 + o_y s_1) - o_z s_2] + c_4 (-o_x s_1 + o_y c_1) \end{cases}$$

所以：

$$\theta_6 = \arctan\left(\frac{s_6}{c_6}\right) \quad (2-58)$$

至此， θ_1 、 θ_2 、 d_3 、 θ_4 、 θ_5 、 θ_6 全部求出。

从以上解的过程看出，这种方法就是将一个未知数由矩阵方程的右边移向左边，使其与其它未知数分开，解出这个未知数，再把下一个未知数移到左边，重复进行，直至解出所有未知数，所以这种方法也叫分离变量法。这是代数法的一种，它的特点是首先利用运动方程的不同形式，找出矩阵中简单表达某个未知数的元素，力求得到未知数较少的方程。然后求解。

4. 机器人运动学逆解过程中存在的问题

在工业机器人运动学逆解问题的求解过程中，还应注意如下三个问题：

(1) 解可能不存在

工业机器人具有一定的工作域，假如给定手部位置在工作域之外，则解不存在。图 2.42 所示二自由度平面关节机械手，假如给定手部位置矢量 (x, y) 位于外半径为 l_1+l_2 与内半径为 $|l_1-l_2|$ 的圆环之外，则无法求出逆解 θ_1 及 θ_2 ，即该逆解不存在。

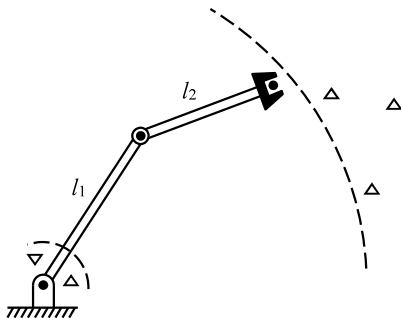


图 2.42 工作域外逆解不存在

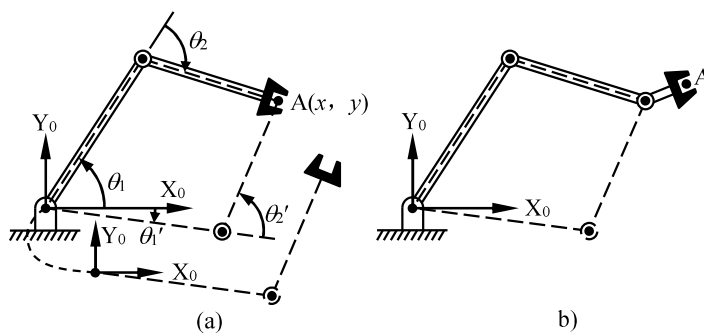


图 2.43 逆解的多重性

(2) 解的多重性

工业机器人的逆运动学问题可能出现多解。图 2.43(a) 表示一个二自由度平面关节机械手出现两个逆解的情况。对于给定的在工业机器人工作域内的手部位置 $A(x, y)$ 可以得到两个逆解： θ_1 、 θ_2 及 θ_1' 、 θ_2' 。从图(a)可知手部是不能以任意方向到达目标点 A 的。增加一个手腕关节自由度，如图(b)所示三自由度平面关节机械手即可实现手部以任意方向到达目标点 A。

在多解情况下，一定有一个最接近解，即最接近起始点的解。图 2.44(a)表示 3R 机械手的手部从起始点 A 运动到目标点 B，完成实线所表示的解为最接近解，是一个“最短行程”的优化解。但是，如图 2.44 (b)所示，在有障碍存在的情况下，上述的最接近解会引起碰撞，只能采用另一解，如图 2.44 (b)中实线所示。尽管大臂、小臂将经过“遥远”的行程，为了避免碰撞也只能用这个解，这就是解的多重性带来可供选择的好处。

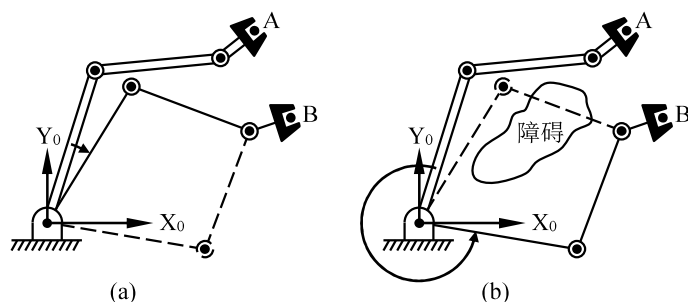


图 2.44 避免碰撞的一个可能实现的解

关于解的多重性的另一实例如图 2.45 所示。PUMA560 工业机器人实现同一目标位置和姿态有四种形位，即四种解。另外，腕部的“翻转”又可能得出两种解，其排列组合共可能有 8 种解。

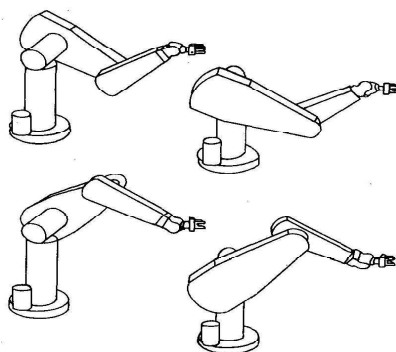


图 2.45 PUMA560 机器人的四个逆解

(3) 求解方法的多样性

工业机器人逆运动学求解有多种方法，一般分为两类：封闭解和数值解。不同学者对同一工业机器人的运动学逆解也提出不同的解法。应该从计算方法的计算效率、计算精度等要求出发，选择较好的解法。

【本课小结】

本课主要讲解了工业机器人技术的运动学基础知识，涉及连杆参数及连杆坐标系的建立、连杆坐标系之间的变换矩阵、机器人运动学一般方程，并介绍了正逆向运动学以及实例。

教 案

机器人原理及应用 课 14-15 讲

主讲人 王瑜 王鹏

课题

工业机器人的检测系统

目的任务

- 1.了解工业机器人的感知技术;
- 2.了解工业机器人传感器概述;
- 3.掌握工业机器人的内部传感器;掌握工业机器人的外部传感器;
- 4.了解工业机器人视觉技术。

重点难点

重点: 1. 工业机器人的感知技术。

2. 工业机器人传感器概述。

3. 工业机器人的内部传感器。

4. 工业机器人的外部传感器。

5. 工业机器人视觉技术。

难点:

1. 内部传感器及其工作原理

2. 外部传感器及其工作原理

教学方法

开放实验、课堂讲授、课堂互动讨论, 启发式提问、雨课堂

使用教具

板书、多媒体、雨课堂

备课时间

2020年2月10日

上课时间

2020年4月14日

2020年4月16日

主讲教师(签字): 王瑜

课程负责人(签字): 王瑜

2020年3月24日

授课章节： 第7章 工业机器人的检测系统	
<p>教学目的及要求：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 了解工业机器人的感知技术。 2. 了解工业机器人传感器概述。 3. 掌握工业机器人的内部传感器。 4. 掌握工业机器人的外部传感器。 5. 了解工业机器人视觉技术。 	
<p>教学重点：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 工业机器人的感知技术。 2. 工业机器人传感器概述。 3. 工业机器人的内部传感器。 4. 工业机器人的外部传感器。 5. 工业机器人视觉技术。 	
<p>教学难点：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 内部传感器及其工作原理 2. 外部传感器及其工作原理 	
<p>教学步骤及内容：</p> <p>一、工业机器人的感知技术</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 人与外界环境 2. 信号获取 <p>二、工业机器人传感器概述</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 传感器定义 2. 传感器技术参数 3. 主要传感器分类及其作用 <p>三、工业机器人的内部传感器</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 内部传感器定义 2. 讲解直线型电位器式位置传感器工作原理 3. 讲解旋转型电位器式位置传感器工作原理 4. 讲解绝对式光电编码器工作原理 5. 讲解相对式光电编码器工作原理 6. 讲解速度传感器工作原理 <p>四、工业机器人的外部传感器</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 外部传感器定义 2. 外部传感器种类 	旁批栏：

7 工业机器人的检测系统

机器人是由计算机控制的复杂机器，它具有类似人的肢体和感官功能，动作程序灵活，有一定程度的智能，在工作时可以不依赖人的操纵。机器人传感器在机器人的控制中起到了非常重要的作用，正是因为有了传感器，机器人才具备了类似人类的知觉功能和反应能力。介绍我国中高档传感器产品大多数从国外进口，传感器关键技术被国外垄断，我国已经将传感器上升到国家战略，所以必须紧紧追赶，弯道超车，开辟出属于中国芯片的一条路。从而激励学生，培养学生的爱国情怀、甘于奉献和敬业精神。

7.1 机器人传感器的分类

根据不同的分类方式，机器人传感器分类不同，根据检测对象的不同可以分为内部传感器和外部传感器。

(1) 内部传感器：用来检测机器人本身状态（如手臂间角度）的传感器。多为检测位置和角度的传感器。

(2) 外部传感器：用来检测机器人所处环境（如是什么物体，离物体的距离有多远等）及状况（如抓取的物体是否滑落）的传感器。具体有物体识别传感器、物体探伤传感器、接近觉传感器、距离传感器、力觉传感器，听觉传感器等。

表 7-1 机器人内部传感器

传感器	检测功能
码盘、电位器光栅	角度、位移
速度传感器	速度、角速度
加速度传感器	加速度
倾斜仪	倾斜角度
陀螺仪	方位角
力/力矩传感器	力/力矩

表 7-2 机器人外部传感器

传感器	感知
视觉传感器	外部环境
触觉、滑觉传感器	接触、滑动
接近觉传感器	距离
热觉传感器	温度
力觉传感器	力和力矩
传感器	感知
嗅觉传感器	气味
听觉传感器	声音
味觉传感器	味道
角度觉传感器(陀螺仪、倾斜仪)	方位

7.2 传感器的定义

传感器是借助检测元件将一种形式的信息转换成另一种信息的装置。目前,传感器转换后的信号大多为电信号。因而从狭义上讲,传感器是把外界输入的非电信号转换成电信号的装置。事实上传感器是一种按一定的精确度、规律将被测量(物理的、化学的和生物的信息)转换成与之有确定关系的、便于应用的某种物理量(通常是电量)的测量装置。它是自动控制系统(机器人)必不可少的一部分。

7.3 传感器的构成

测试系统的组成如图 7-1 所示。主要由被测对象、传感器、中间变换装置和显示记录装置等组成。

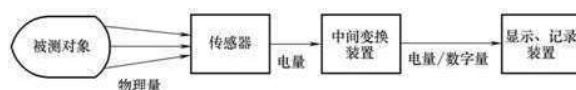


图 7-1 测试系统的组成

传感器的组成框图如图 7-2 所示。其中,敏感元件的作用是感受被测物理量,并对信号进行转换输出。辅助元件则是对敏感元件输出的电信号进行放大、阻抗匹配,以便于后续仪表接入。

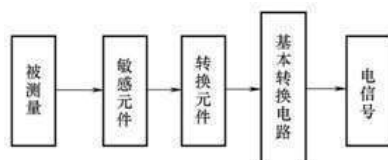


图 7-2 传感器的组成框图

7.4 传感器的主要性能指标

为评价或选择传感器,通常需要确定传感器的性能指标,传感器的性能指标又分为静态特性与动态特性。

(1) 静态特性

传感器的静态特性是指对静态的输入信号,传感器的输出量与输入量之间所具有的相互关系。

表征传感器静态特性的主要参数有:线性度、灵敏度、分辨力、量程和迟滞等。

1) 传感器的线性度: 输出信号的变化与输入信号变化的比值是否保持常数。

线性度(非线性误差)就是这个近似程度的一个性能

指标。拟合直线的选取有多种方法如将零输入和满量程输出点相连的理论直线作为拟合直线；或将与特性曲线上各点偏差的平方和为最小的理论直线作为拟合直线，此拟合直线称为最小二乘法拟合直线。

2) 传感器的灵敏度。灵敏度是指传感器在稳态工作情况下输出量变化 A_y 对输入量变化 A_x 的比值。它是输出—输入特性曲线的斜率。

$$S = \frac{A_y}{A_x} \quad (7-1)$$

灵敏度的量纲是输出、输入量的量纲之比。例如，某位移传感器，在位移变化1mm时，输出电压变化为20mV则其灵敏度应表示为20mV/mm。当传感器的输出、输入量的量纲相同时，灵敏度可理解为放大倍数。如果传感器的输出和输入之间呈曲线关系，则灵敏度就是该静态特性曲线的导数；提高灵敏度，可得到较高的测量精度。但灵敏度越高测量范围越窄，稳定性也往往越差。

3) 传感器的分辨力。分辨力是指传感器可能感受到的被测量的最小变化的能力。

通常传感器在满量程范围内各点的分辨力并不相同，因此常用满量程中能使输出量产生阶跃变化的输入量中的最大变化值作为衡量分辨力的指标。上述指标若用满量程的百分比表示，则称为分辨率。

4) 传感器的量程。量程是指传感器适用的测量范围。每个传感器都有其测量范围，如超出其测量范围将不可靠，甚至损坏传感器。

5) 传感器的迟滞。传感器在标定过程中加载输出与卸载输出之间的不重合性称为迟滞。传感器的迟滞特性如图7-3所示，它一般是由实验方法测得。迟滞误差一般以满量程输出的百分数表示，即 $y_H = \pm (1/2)(A_{max} - A_{min}) / y_{FS} \times 100\%$

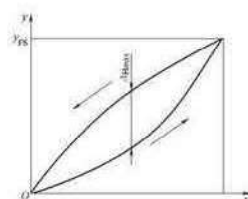


图 7-3 传感器的迟滞特性

(2) 动态特性

传感器的动态特性指传感器在输入变化时,它的输出的特性。如:响应时间。

在实际工作中,传感器的动态特性常用它对某些标准输入信号的响应来表示。

这是因为传感器对标准输入信号的响应容易用实验方法求得,并且它对标准输入信号的响应与它对任意输入信号的响应之间存在一定的关系,往往知道了前者就能推定后者。最常用的标准输入信号有阶跃信号和正弦信号两种,所以传感器的动态特性也常用阶跃响应和频率响应来表示。

7.5 机器人传感器

(1) 机器人内部传感器

1) 定义:内部传感器是用于测量机器人自身状态的功能元件。

2) 目的:对自身的运动状态进行检测,即检测机器人各个关节的位移、速度和加速度等运动参数,为机器人的控制提供反馈信号。

3) 测量参数:机器人内部传感器主要测量运动学和力学参数,

4) 意义:使机器人能够按照规定的位置、轨迹和速度等参数进行工作,感知自己的状态并加以调整和控制。

内部传感器通常由位置传感器、角度传感器、速度传感器和加速度传感器等组成。

5)位置传感器

位置传感器主要是对机器人关节的位置和位移进行检测。

检测给定的位置,常用 ON/OFF 两个状态值。这种方法用于检测机器人的起始原点、终点位置或某个确定的位置。给定位位置检测常用的检测元件有微型开关、光电开关等。直线位移传感器如图 7-4 所示。



图 7-4 直线位移传感器

如图 7-5 所示，这是一个位置传感器的实例。在载有物体的工作台下面有同电阻接触的触头，当工作台左右移动时，接触触头也随之左右移动，从而移动了与电阻接触的位置。检测的是以电阻中心为基准位置的移动距离。

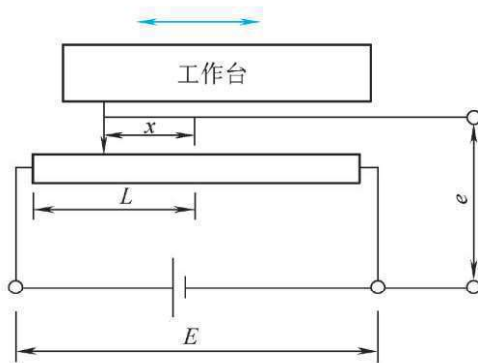


图 7-5 线性电位计

假定输入电压为 E ，最大移动距离（从电阻中心到一端的长度）为 L ，在可动触头从中心向左端只移动 x 的状态，假定电阻右侧的输出电压为 e 。若在图 6-1 的电路流过一定的电流，由于电压与电阻的长度成比例（全部电压按电阻长度进行分压），所以左、右的电压比等于电阻长度比，也就是

$$(E - e) / e = (L - x) / (L + x) \quad (7-2)$$

因此，可得移动距离 x 为

$$x = \frac{L(2e - E)}{E} \quad (7-3)$$

把图 7-5 中的电阻元件弯成圆弧形，可动触头的另一端固定在圆的中心，并像时针那样回转时，由于电阻长随相应的回转角而变化，因此基于上述同样的理论可构成角度传感器。如图 7-6 所示，这种电位计由环状电阻器和与其一边电气接触一边旋转的电刷共同组成。当

电流沿电阻器流动时，形成电压分布。如果将这个电压分布制作成与角度成比例的形式，则从电刷上提取出的电压值，也与角度成比例。作为电阻器，可以采用两种类型，一种是用导电塑料经成形处理做成的导电塑料型，如图 7-6a 所示；另一种是在绝缘环上绕上电阻线做成的线圈型，如图 7-6b 所示。

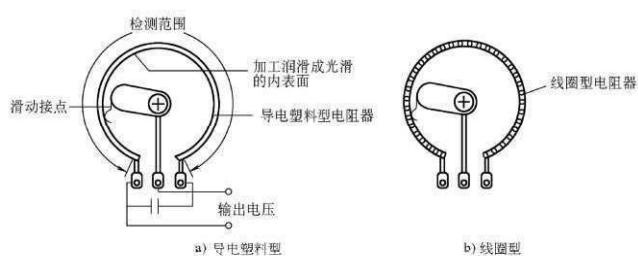


图 7-6 角度式电位计

2) 机器人的角度传感器

应用最多的旋转角度传感器是旋转编码器。旋转编码器又称转轴编码器、回转编码器等，它把连续输入的轴的旋转角度同时进行离散化（样本化）和量化处理后予以输出。

绝对式编码器：电源加到这种传感器的机电系统中，编码器就能给出实际的线性或旋转位置。因此，用绝对型编码器装备的机器人关节不要求校准，只要一通电，控制器就知道实际的关节位置。

增量型编码器：只能提供与某基准点对应的位置信息。所以用增量型编码器的机器人在获得真实位置信息以前，必须首先完成校准程序。

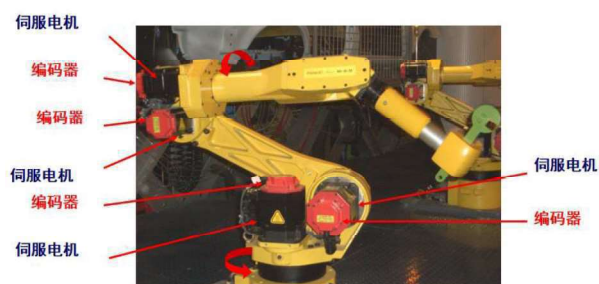


图 7-7 编码器在机器人控制中的应用



图 7-8 编码器的测量对象

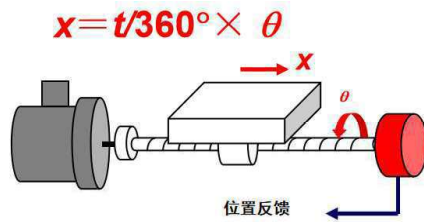


图 7-9 编码器装在丝杠末端

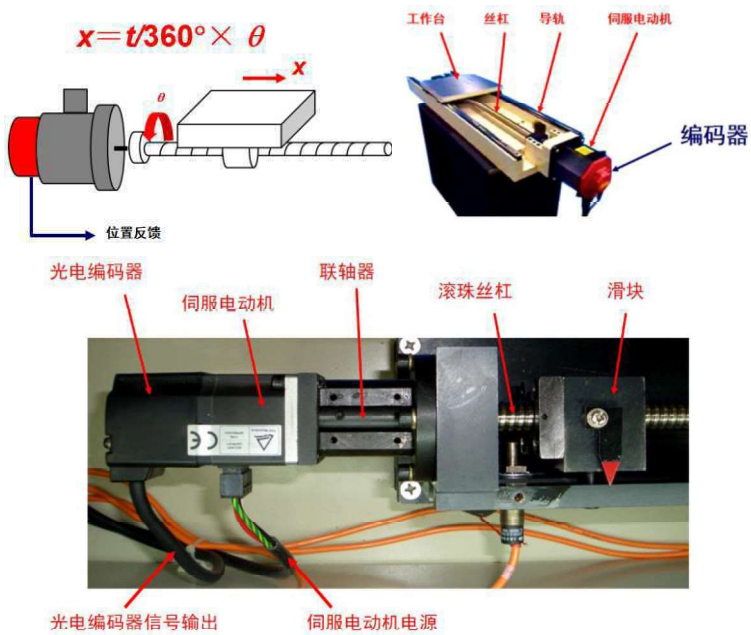


图 7-10 编码器和伺服电动机同轴安装

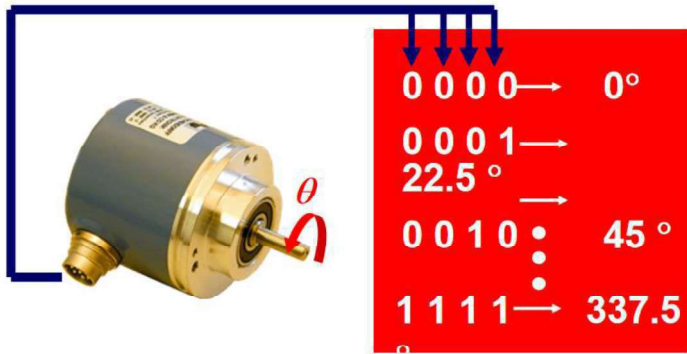


图 7-11 绝对式测量编码器信号性质

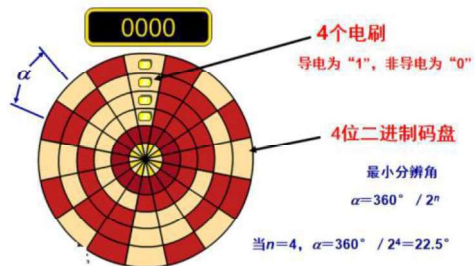


图 7-12 接触式绝对码盘

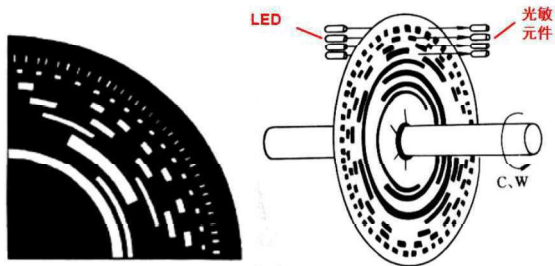


图 7-13 绝对式光电码盘

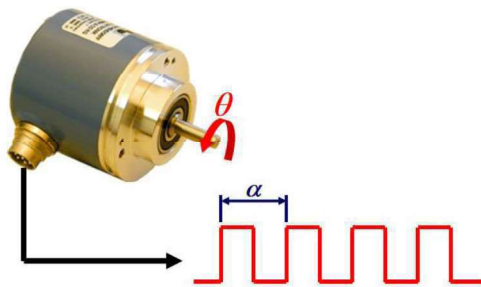


图 7-14 增量式测量信号性质

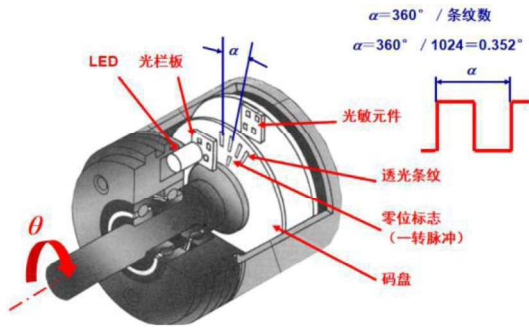


图 7-15 增量式编码器的结构

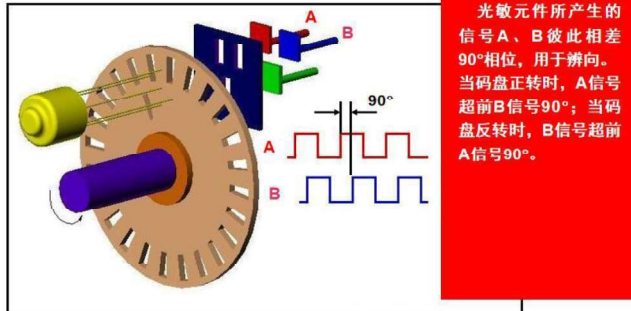


图 7-15 辨向

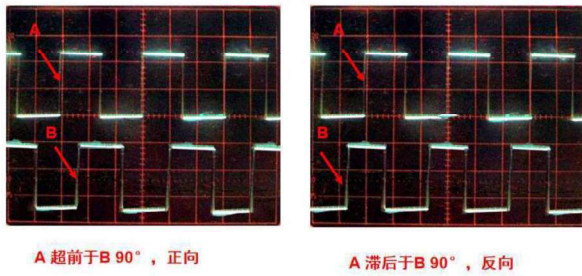


图 7-16 辨向信号

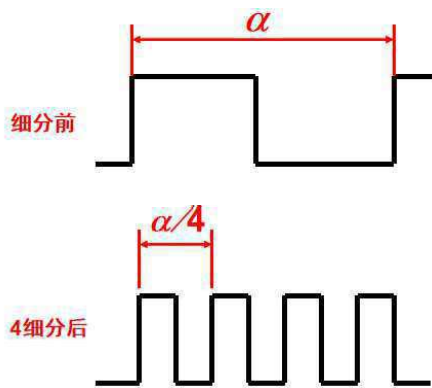


图 7-17 倍频 (细分)

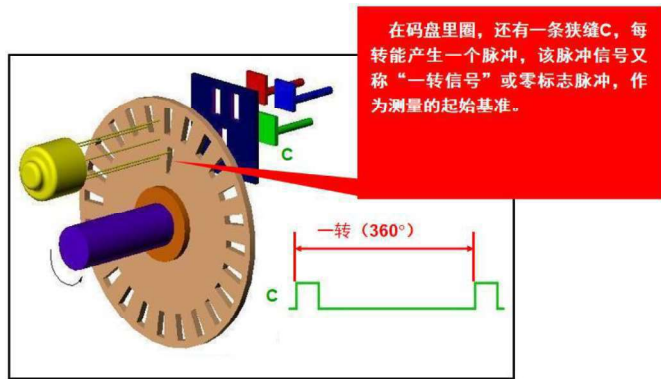


图 7-18 零标志（一转脉冲）

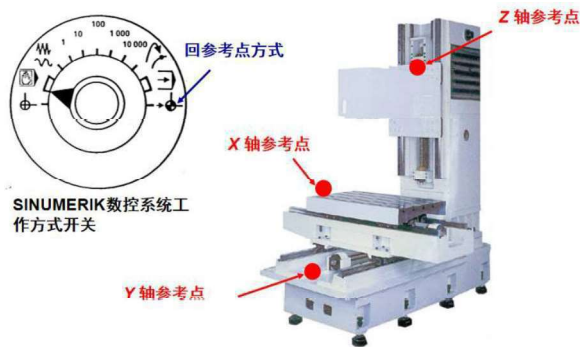


图 7-19 零标志在回参考点中的作用

6) 编码器在数字测速中的应用

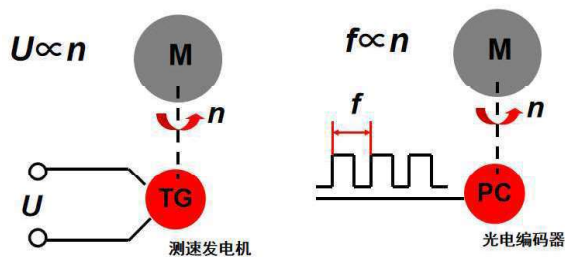


图 7-20 模拟测速和数字测速的比较

编码器每转产生 N 个脉冲, 在 T 时间段内有 m_1 个脉冲产生, 则转速 (r/min) 为:

$$n = 60m_1 / (NT) \quad (7-4)$$

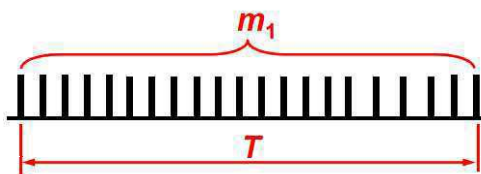


图 7-21 M 法测速 (适合于高转速场合)

编码器每转产生 N 个脉冲, 用已知频率 f_c 作为时钟, 填充到编码器输出的两个相邻脉冲之间的脉冲数为

m2, 则转速(r/min)为:

$$n = 60fc / (Nm2) \quad (7-5)$$

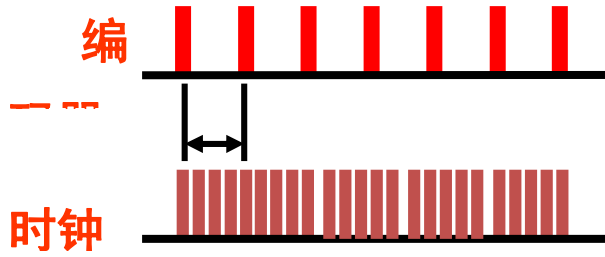


图 7-22 T 法测速 (适合于低转速场合)

7) 编码器在主轴控制中的应用

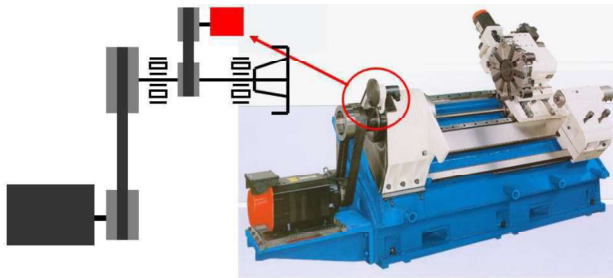


图 7-23 主轴编码器

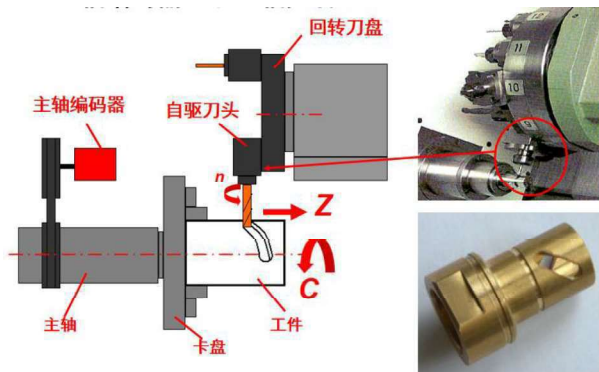
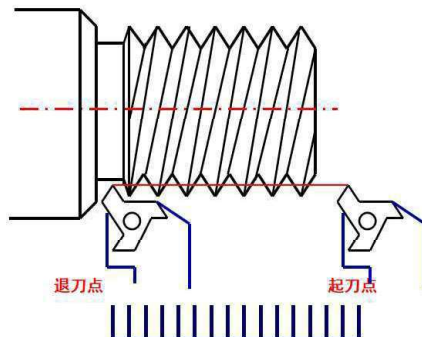


图 7-24 主轴编码器用于 C 轴控制

车削螺纹时, 为保证每次切削的起刀点不变, 防止



“乱牙”, 主轴编码器通过对起刀点到退刀点之间的脉冲进行计数来达到车削螺纹的目的。

图 7-25 主轴编码器用于螺纹车削

(2) 机器人外部传感器

外部传感器主要用来检测机器人所处环境及目标状况,如是什么物体,离物体的距离有多远,抓取的物体是否滑落等。从而使得机器人能够与环境发生交互作用,并对环境具有自我校正和适应能力。

外界检测传感器通常包括触觉、接近觉、视觉、听觉、嗅觉和味觉等传感器。

在工业应用中,控制机器人精确地去抓取在某一参考位置上的工件,并非一件容易的事,由于工件本身的变形及其他不确定的因素,最终将需要进行相对位置姿态的调整,通常情况下,移动机器人比移动工件更容易些,可以通过安装在机器人末端上的测距传感器来解决。

测距传感器在移动机器人上应用较多。机器人测距传感器一般都采用主动法直接获取距离信息,用于对机器人进行实时的控制和规划。

测距传感器的作用如下:

①发现前方障碍物,限制机器人的运动范围,以避免与障碍物发生碰撞;

②在接触对象前得到必要的信息,如与物体的相对距离、相对倾角,以便为后续运动规划做准备;

③获取对象表面各点间的距离,从而得到有关对象表面形状的信息。

按照测距的原理不同,机器人测距传感器可分为:接触式传感器、感应式测距传感器、电容式测距传感器、超声测距传感器、光电式测距传感器、气压式测距传感器、微波和无线电波测距传感器等类型。

机器人需要的最重要的感觉能力可分为以下几类:

(1) 简单触觉 确定工作对象是否存在。

(2) 复合触觉 确定工作对象是否存在以及它的尺寸和形状等。

(3) 简单力觉 沿一个方向测量力。

(4) 复合力觉 沿一个以上方向测量力。

(5) 接近觉 对工作对象的非接触探测等。

(6) 简单视觉 孔、边、拐角等的检测。

(7) 复合视觉 识别工作对象的形状等。

除了上述能力以外, 机器人有时还需要具有温度、湿度、压力、滑动量、化学性质等的感觉能力。

(3) 工业机器人的视觉

1) 视觉系统的硬件组成

视觉系统可以分为图像输入(获取)、图像处理、图像理解、图像存储和图像输出几个部分。实际系统可以根据需要选择其中的若干部件。

视觉传感器是将景物的光信号转换成电信号的器件。大多数机器人视觉都不必通过胶卷等媒介物,而是直接把景物摄入。过去经常使用光导摄像等电视摄像机作为机器人的视觉传感器,近年来开发了 CCD(电荷耦合器件)和 MOS(金属氧化物半导体)器件等组成的固体视觉传感器。固体传感器又可以分为一维线性传感器和二维线性传感器,目前二维线性传感器已经能做到四千个像素以上。由于固体视觉传感器具有体积小、重量轻等优点,因此应用日趋广泛。

由视觉传感器得到的电信号,经过 A / D 转换成数字信号,称为数字图像。一般地,一个画面可以分成 256×256 像素、512×512 像素或 1024×1024 像素,像素的灰度可以用 4 位或 8 位二进制数来表示。一般情况下,这么大的信息量对机器人系统来说是足够的。要求比较高的场合,还可以通过彩色摄像系统或在黑白摄像管前面加上红、绿、蓝等滤光器得到颜色信息和较好的反差。

机器人的视觉系统直接把景物转化成图像输入信号,因此取景部分应当能根据具体情况自动调节光圈的焦点,以便得到一张容易处理的图像。为此应能调节以下几个参量:

- (1) 焦点能自动对准要看的物体。
- (2) 根据光线强弱自动调节光圈。
- (3) 自动转动摄像机,使被摄物体位于视野中央。
- (4) 根据目标物体的颜色选择滤光器。

此外,还应当调节光源的方向和强度,使目标物体能够看得更清楚。

- | | |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none">2) 机器人视觉的应用<ul style="list-style-type: none">a) 弧焊过程中焊枪对焊缝的自动对中;b) 装配作业中的应用;c) 机器人非接触式检测;d) 利用视觉的自主机器人系统。 | |
|--|--|

教 案

机器人原理及应用 课 16-17 讲

主讲人 王瑜 王鹏

课题 工业机器人控制系统

目的任务 1. 了解工业机器人控制系统的组成。
2. 掌握工业机器人控制系统的基本结构。
3. 掌握工业机器人常用的控制器原理。

重点难点 重点：工业机器人控制系统的基本结构。
难点：工业机器人常用的控制器。

教学方法 开放实验、课堂讲授、课堂互动讨论，启发式提问、雨课堂

使用教具 板书、多媒体、雨课堂

备课时间 2020年1月25日

上课时间 2020年4月21日
2020年4月23日

主讲教师（签字）：王瑜

课程负责人（签字）：王鹏
2020年2月24日

教学内容	教学设计
<p style="text-align: center;">第六章 工业机器人的控制系统</p> <p>6.1 控制系统概述</p> <p>6.1.1 控制系统的要求</p> <p>工程界对于控制系统好坏三个基本要求：稳定性、快速性、准确性。</p> <p>稳定性：指系统受到外作用时，其动态过程的震荡倾向和恢复平衡的能力。它是系统正常工作的最重要的指标。</p> <p>当干扰作用于系统时，系统输出量会偏移其稳定值，此时在反馈系统的作用下，系统可能会回到或者接近原来的数值并稳定下来，则成为稳定系统。</p> <p>快速性：指系统的输出量与给定的输入量出现偏差时，系统消除偏差的快慢程度。系统响应越快，说明系统的输出复现输入信号能力越强。</p> <p>准确性：指系统在过渡期结束后，输出量与给定输出量的偏差，称为静态偏差或者稳态误差，它是衡量系统工作性能的重要指标。</p> <p>6.1.1 控制系统的分类</p> <p>常见分类如下：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 开环控制系统、闭环控制系统； 2) 线性控制系统、非线性控制系统； 3) 连续控制系统、离散控制系统； <p>6.2 工业机器人运动控制系统</p> <p>6.2.1 工业机器人控制系统作用</p> <p>机器人的控制系统主要用于对机器人工作过程中的动作顺序、目标位置以及姿态、运动路径轨迹及规划、动作时间间隔以及末端执行器作业时的力和力矩进行控制。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 点位式 PTP (Point to Point)： <ul style="list-style-type: none"> 只以终点位置为目标，作准确的移动，而对移动中的轨迹不作控制要求。 典型的应用：spot Welding robot。 	

2) 轨迹式 CP (Continuous Path):在任意特定数量的点处停留。点与点之间的轨迹不做要求一插补。

典型的应用: Arc Welding Robot。

3) 力(力矩)控制:装配、抓取工件等工作时,除了准确定位之外,还要求使用适度的力(力矩)。

力(力矩)反馈---力传感器。

4) 智能控制: AI 技术(人工神经网络、遗传基因算法、模糊控制、专家系统等)。

5) 示教/再现 (teach/play) 控制-----一种主流控制方式:

示教---即教机器人如何去做。在示教过程中,机器人将作业顺序、位置、速度等信息记录下来。

再现---根据这些存储的信息再现示教的动作。

6.2.2 工业机器人控制系统的特点

a) 与机构运动学和动力学紧密相关

机器人的关节臂在不同状态下可以在不同的坐标系进行描述,根据需要,选择不同的坐标系进行坐标变换。因此,经常要求解运动学正逆解以及考虑惯性力等问题。

b) 多变量控制

一般机器人包含 3-6 个自由度,对于双臂机器人可能包含十几个自由度,每一个自由度的控制都是一个伺服系统,要实现机器人的运动,需要对多个自由度进行协调控制

c) 计算机控制系统

要对多个自由度进行协调控制,是机器人具有一定的“智能”,必须采用计算机进行控制

d) 耦合非线性控制

描述机器人的运动和状态的数学模型是一个非线性模型,虽状态和外部变化,参数变化大,各参数间存在相互耦合。仅用位置闭环是不够的,还要利用速度闭环甚至加速度闭环。以及各种补偿或自适应控制方法。

e) 寻优控制

6.2.3 工业机器人控制系统分类

1) 集中式控制：利用一台计算机实现机器人系统的全部控制功能，基于计算机的集中式控制器，充分利用了计算机资源开放性的特点，可以实现很好的开放性。

2) 分布式控制：其主要思想为“分散控制，集中管理”，即系统对其总体目标和任务可以进行综合协调和分配，并通过子系统的协调工作来完成控制任务，整个系统在功能、逻辑和物理等方面都是分散的。

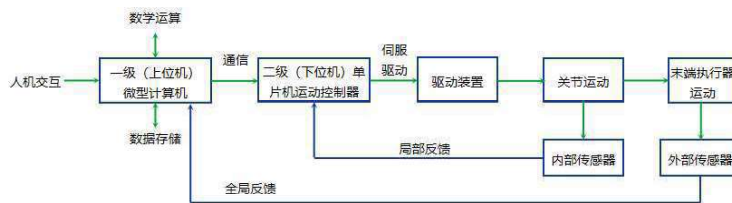


图 6-1 机器人分布式控制系统的工作过程

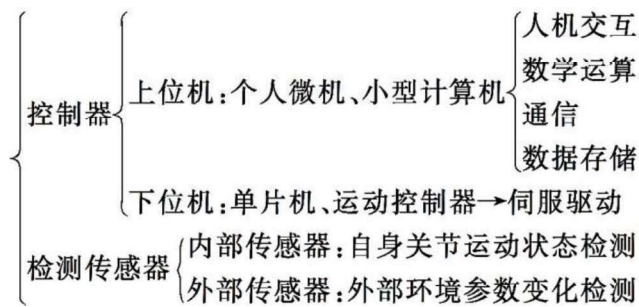


图 6-2 机器人控制系统的硬件组成

图 6-3 开放式机器人控制系统结构

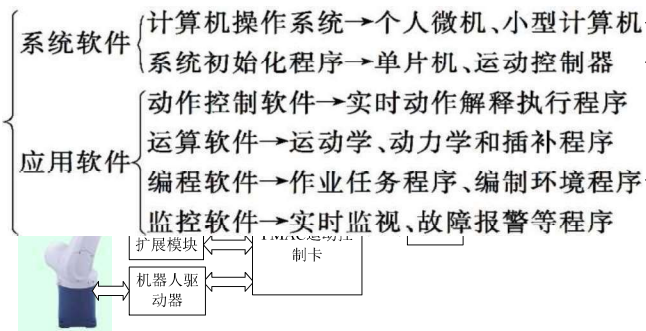
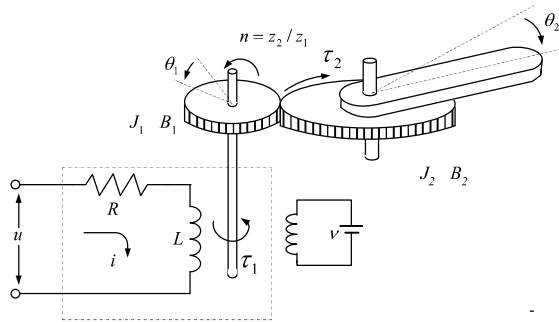


图 6-4 机器人控制系统的软件组成

6.3 单关节机器人控制

图 6-5 直流伺服电动机驱动机器人关节的简化模型



6.4 工业机器人运动控制系统实例分析

工业机器人 PID 控制：按照偏差的比例 (P,proportion)、积分(I,integral)、微分(D,derivative)进行控制的一种基本的控制算法。它具有原理简单、易于实现、鲁棒性强和适用面广等优点。

理想微分 PID 控制：理想 PID 控制的基本形式如图 6-6 所示。

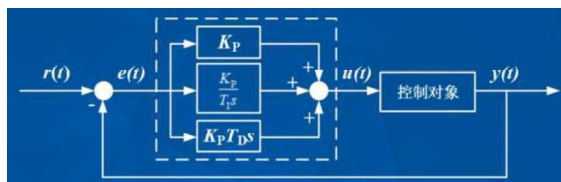


图 6-6 理想 PID 控制的基本形式

PID 控制的传递函数为：

$$G(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (6-1)$$

其中, k_p 为比例增益; T_i 为积分时间; T_d 为微分时间; u 为操作量; e 为控制输入量和输出量之间的偏差。

PID 算法的作用： K_p 决定控制系统的强弱： K_p 增加减小稳态误差，提高动态响应速度； K_p 过大引起控制量振荡，降低闭环控制系统的稳定性。

T_i 可削弱稳态误差：只要存在偏差，积分环节所产生的控制量就可以消除稳态误差，动态变化慢，且过强的积分作用是超调量增大。

T_d 与偏差变化速度有关：微分环节能超前预测偏差，能超前进行系统校正。减小超调，克服振荡，加快响应速度。

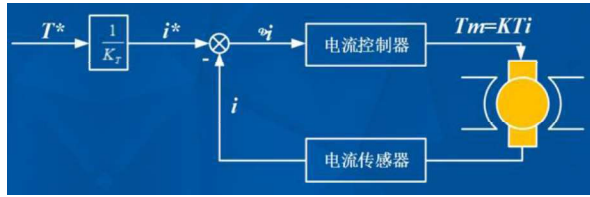


图 6-7 伺服控制系统原理图-转矩控制

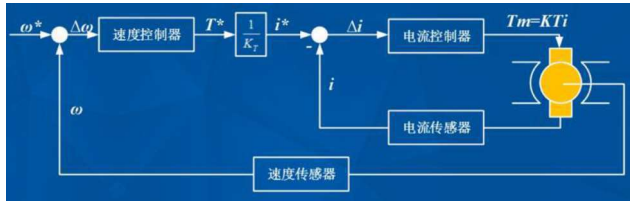


图 6-8 伺服控制系统原理图-速度控制

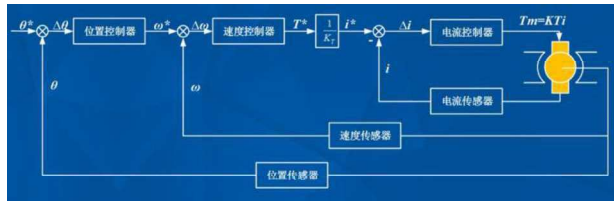


图 6-9 伺服控制系统原理图-位置控制

教 案

机器人原理及应用 课 18-19 讲

主讲人 王鹏

课题 工业机器人的轨迹规划


目的任务 1.了解工业机器人轨迹规划的概念
2.掌握工业机器人轨迹规划一般方法


重点难点 重点：工业机器人的轨迹规划的概念
难点：1.工业机器人轨迹规划的多项式方法；
2.利用Matlab求解多项式轨迹的位移、速度、加速度曲线，并进行分析

教学方法 开放实验、课堂讲授、课堂互动讨论

使用教具 PPT，计算机，matlab

备课时间 2020年1月31日 **上课时间** 2020年4月28日,4月30日

主讲教师（签字）: 

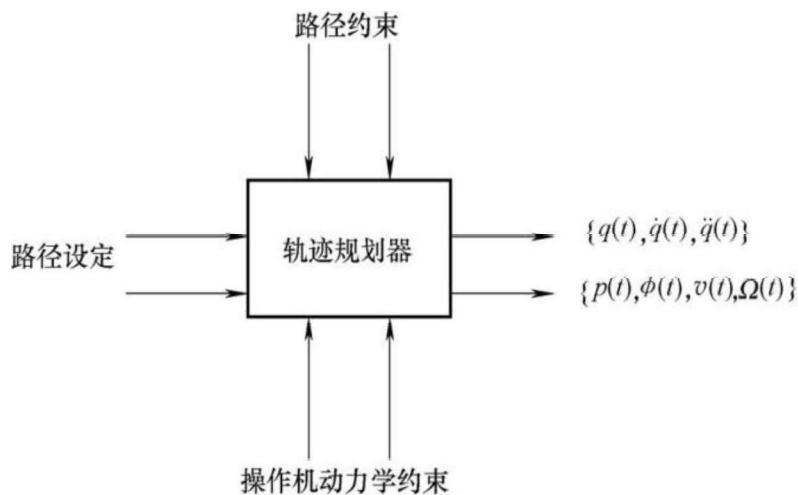
课程负责人（签字）: 

2020年2月24日

教学内容	教学设计
<div data-bbox="323 353 922 846" data-label="Figure"> </div> <p>明确四个概念，路径和轨迹：前者是单一空间概念，后者是复合时空概念。工作空间和关节空间：这两个概念在机器人学中定义的很明确。</p> <p>数控机床中最常见的插补运算直线插补和圆弧插补，实际上就是在工作空间中一种路径规划，更确切的讲是把道具的运动看成质点运动的路径规划。因为它没有考虑质点的运动状态，更没有考虑刀具的姿态。</p> <p>轨迹：运动轨迹，包括瞬时运动点的位移、速度以及加速度。</p> <p>规划：一种求解算法，从某个特定问题的初始状态出发，构造一些列的操作步骤（算子），以达到解决问题目的。</p> <h3>9.1 机器人轨迹的概念</h3> <p>机器人的轨迹规划是指根据作业任务的要求(作业规划),机器人末端执行器在工作过程中位置和姿态变化的路径、取向以及它们变化速度和加速度的人为设定。根据机器人所完成的作业任务要求,当给定初始状态、目标状态以及路径所经过的有限个给定点的情况下,对于没有给定的路径区间则必须要选择关节插值函数,生成不同的轨迹。</p> <p>工业机器人轨迹规划属于机器人低层规划,基本上不涉及人工智能的问题。</p> <p>轨迹规划的流程：任务规划器根据输入的任务要求,规划执行任务所需的运动,根据环境的内部模型和外部传感器在线采集的数据产生控制指令。而轨迹规划是根据作业任务的要求,计算出预期的运动轨迹。</p> <p>轨迹规划方法一般是在机器人末端初始位置和目标位置之间用多项式函数来“内插”或“逼近”给定的路径,并沿时间轴产生一系列“控制设定点”,供机器人控制之用。</p> <p>在给定的两端点之间,常有多条可能的轨迹。例如,可以</p>	<p>结合数控系统插补原理，理解轨迹规划的概念</p>

要求机器人沿连接端点的直线运动(直线轨迹);也可以要求它沿一条光滑的多项式轨迹运动,在两端点处满足位置和姿态约束(关节变量插值轨迹)。

轨迹规划问题的通常处理方法是将轨迹规划器看成“黑箱”,轨迹规划器接收表示路径约束的输入变量,输出起点和终点之间按时间排列的机器人末端执行器中间形态(位置和姿态、速度、加速度)序列,它们可用关节坐标或笛卡儿坐标表示。规划机器人末端执行器轨迹,有两种常用的方法。



笛卡尔坐标中的缺点:

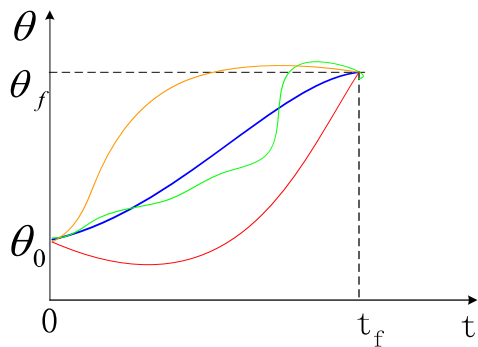
由于目前还没有用笛卡儿坐标测量机器人手部位置的传感器,所有可用的控制算法都是建立在关节坐标基础上的。因此,笛卡儿空间路径规划就需要在笛卡儿坐标与关节坐标之间进行实时变换,计算任务量大,控制实时性较差。

如果在轨迹规划阶段考虑机器人的动力学特性,就要以笛卡儿坐标给定路径约束,同时以关节坐标给定物理约束(如每个关节电动机的力和力矩、速度和加速度极限)。这就会使最后的优化问题具有在两个不同坐标系中的混合约束。

通常采用**关节坐标插值**进行工业机器人轨迹规划

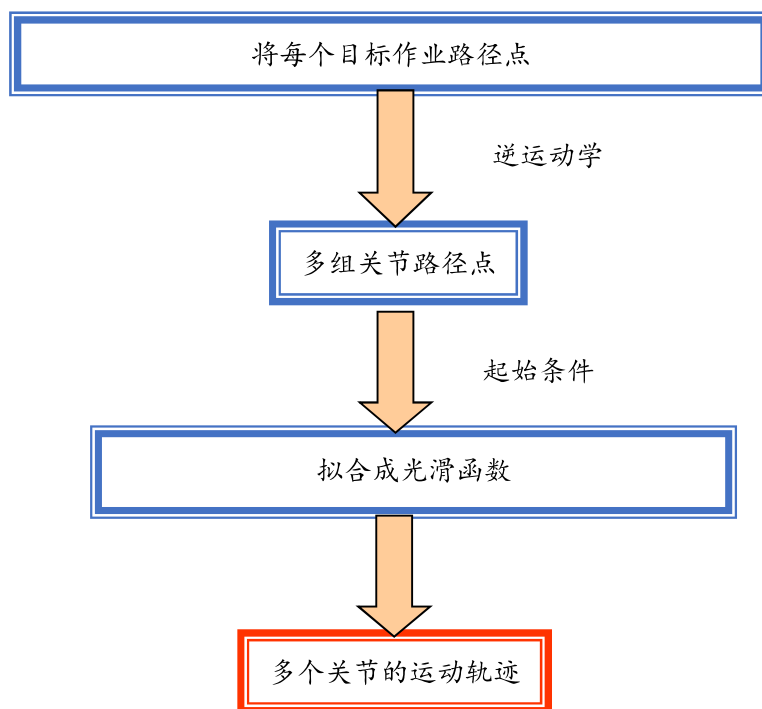
不仅要规定机器人的起始点和终止点,而且要给出介于起始点和终止点之间的中间点,也称路径点。运动轨迹除了位姿约束外,还存在着各路径点之间的时间分配问题。例如,在规定路径的同时,必须给出两个路径点之间的运动时间。

要求所选择的运动轨迹描述函数必须连续,而且它的一阶导数(速度),有时甚至二阶导数(加速度)也应该连续。



单个关节的不同轨迹曲线

关节空间插值法



每个关节在相应路径段运行的时间相同,这样就保证了所有关节都将同时到达路径点和目标点,从而也保证了工具坐标系在各路径点具有预期的位姿。

9.2 机器人轨迹的一般问题

为了控制机器人,在规划运动轨迹之前,需要给定机器人在初始点和终止点的手臂形态。在规划机器人关节插值运动轨迹时,需要注意下述几点:

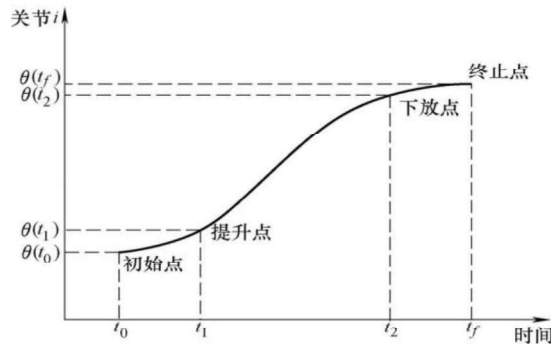
1)抓住一个物体时,手的运动方向应该指向离开物体支承表面的方向,否则,手可能与支承面相碰。

2)若沿支持面的法线方向从初始点向外给定一个离开位置(提升点),并要求手(即手部坐标系的原点)经过此位置,这种离开运动是允许的。如果还给定由初始点运动到离开位

置的时间,就可以控制提起物体运动的速度。

3)对于手臂运动提升点的要求同样也适用于终止位置运动的下放点(即必须先运动到支承表面外法线方向上的某点,再慢慢下移至终止点)。这样,可获得和控制正确的接近方向。

4)综合起来,对手臂的每一次运动,都是四个点:初始点、提升点、下放点和终止点(见图)。



5)位置约束。

① 初始点:给定速度和加速度(一般为零)。② 提升点:中间点运动的连续。③ 下放点:同提升点。④ 终止点:给定速度和加速度(一般为零)。

6)除上述约束外,所有关节轨迹的极值不得超出每个关节变量的物理和几何极限。

7)时间的考虑。① 轨迹的初始阶段和终止段:时间由手接近和离开支承表面的速率决定;也是由关节电动机特性决定的某个常数。② 轨迹的中间点或中间段:时间由各关节的最大速度和加速度决定,将使用这些时间中的一个最长的时间(即用最低速关节确定的最长时间来归一化)。

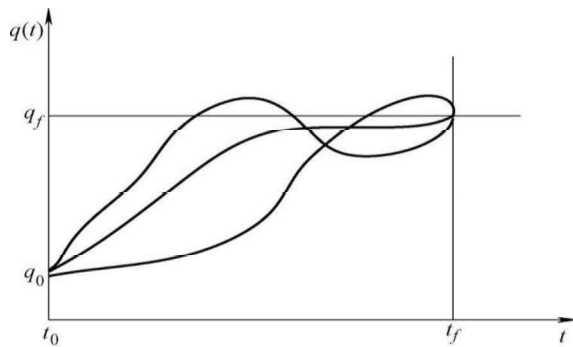
在这些约束之下,所要研究的是选择一种 n 次(或小于 n 次)的多项式函数,使得在各结点(初始点、提升点、下放点和终止点)上满足对位置、速度和加速度的要求,并使关节位置、速度和加速度在整个时间间隔 $[t_0, t_f]$ 中保持连续。一种方法是为每个关节规定一个七次多项式函数,即

$$q_i(t) = a_7t^7 + a_6t^6 + a_5t^5 + a_4t^4 + a_3t^3 + a_2t^2 + a_1t + a_0$$

将整个关节空间轨迹分割成几段,在每段轨迹中用不同的低次多项式来插值,有几种分割轨迹的方法,每种方法的特性各不相同。常用的有 4-3-4 关节轨迹(4 次多项式-3 次多项式-4 次多项式)、3-5-3 关节轨迹和五段三次关节轨迹。

9.2.1 三次多项式插值

运动轨迹的描述可用起始点关节角度与终止点关节角度的一个平滑函数 $q(t)$ 来表示, $q(t)$ 在 $t_0=0$ 时刻的值是起始关节角度 q_0 , 在终端时刻 t_f 的值是终止关节角度 q_f 。显然满足这个条件的光滑函数可以有許多条,如图所示。问题:求出一组通过起始点和终点的光滑函数。



(适用于起点和终点速度为零的情况,约束关节在起点和终点的角度值,规定轨迹两端点位置角速度为定值)

为了实现单个关节的平稳运动,轨迹函数 $q(t)$ 至少需要满足四个约束条件。其中两个约束条件是起始点和终止点对应的关节角度:

$$\begin{cases} q(0) = q_0 \\ q(t_f) = q_f \end{cases}$$

为了满足关节运动速度的连续性要求,另外还有两个约束条件,即在起始点和终止点的关节速度要求。在当前情况下,规定:

$$\begin{cases} \dot{q}(0) = 0 \\ \dot{q}(t_f) = 0 \end{cases}$$

得到有关系数 a_0 、 a_1 、 a_2 和 a_3 的四个线性方程:

$$\begin{cases} q_0 = 0 \\ q_f = a_0 + a_1 t_f + a_2 t_f^2 + a_3 t_f^3 \\ 0 = a_1 \\ 0 = a_1 + 2a_2 t_f + 3a_3 t_f^2 \end{cases}$$

求解上述方程组可得

$$\begin{cases} a_0 = q_0 \\ a_1 = 0 \\ a_2 = \frac{3}{t_f^2} (q_f - q_0) \\ a_3 = -\frac{2}{t_f^3} (q_f - q_0) \end{cases}$$

例1 要求一个六轴机器人的第一关节在5秒钟内从初始角 30° 运动到终端角 75° ,且起始点和终止点速度均为零。用三次多项式规划该关节的运动,并计算在第1、2、3秒和第4秒时关节的角度。

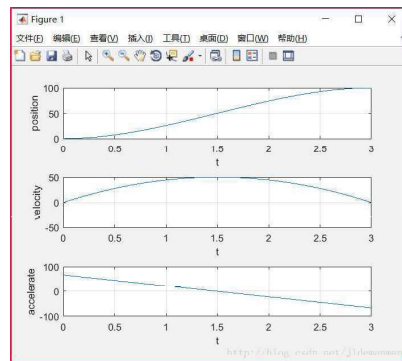
matlab 代码实现

```

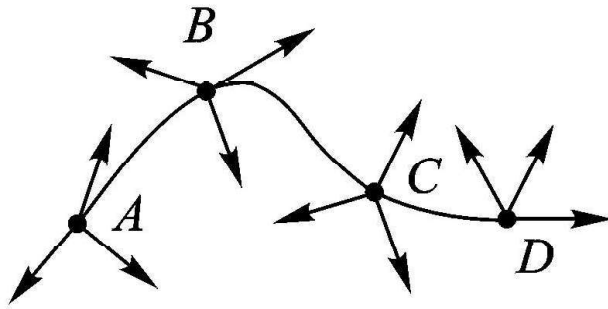
clear;
clc;
q0=0;
q1=100;%指定起止位置
t0=0;
t1=3;%指定起止时间
v0=0;
v1=0;%指定起止速度
a0=q0;
a1=v0;
a2=(3/(t1)^2)*(q1-q0)-(1/t1)*(2*v0+v1);
a3=(2/(t1)^3)*(q0-q1)+(1/t1^2)*(v0+v1);%计算三次多项式系数
t=t0:0.01:t1;
q=a0+a1*t+a2*t.^2+a3*t.^3;%三次多项式插值的位置
v=a1+2*a2*t+3*a3*t.^2;%三次多项式插值的速度
a=2*a2+6*a3*t;%三次多项式插值的加速度
subplot(3,1,1),plot(t,q),xlabel('t'),ylabel('position');grid on;
subplot(3,1,2),plot(t,v),xlabel('t'),ylabel('velocity');grid on;
subplot(3,1,3),plot(t,a),xlabel('t'),ylabel('accelerate');grid on;

```

序号	位置	速度	时间
1	0	0	0
2	100	0	3



把每个关节上相邻的两个路径点分别看做起始点和终止点，再确定相应的三次多项式插值函数，把路径点平滑连接起来。一般情况下，这些起始点和终止点的关节运动速度不再为零。



速度约束条件

$$\begin{cases} \dot{q}(0) = \dot{q}_0 \\ \dot{q}(t_f) = \dot{q}_f \end{cases}$$

$$\begin{cases} q_0 = 0 \\ q_f = a_0 + a_1 t_f + a_2 t_f^2 + a_3 t_f^3 \\ \dot{q}_0 = a_1 \\ \dot{q}_f = a_1 + 2a_2 t_f + 3a_3 t_f^2 \end{cases}$$

$$\begin{cases} a_0 = q_0 \\ a_1 = \dot{q}_0 \\ a_2 = \frac{3}{t_f^2} (q_f - q_0) - \frac{2}{t_f} \dot{q}_0 - \frac{1}{t_f} \dot{q}_f \\ a_3 = -\frac{2}{t_f^3} (q_f - q_0) + \frac{1}{t_f} (\dot{q}_0 + \dot{q}_f) \end{cases}$$

求得:

$$a_0 = q_0$$

$$a_1 = \dot{q}_0$$

$$a_2 = \frac{3}{t_f^2} (q_f - q_0) - \frac{2}{t_f} \dot{q}_0 - \frac{1}{t_f} \dot{q}_f$$

$$a_3 = \frac{2}{t_f^3} (q_f - q_0) + \frac{1}{t_f} (\dot{q}_0 + \dot{q}_f)$$

matlab 代码实现

```
clear;
```

```
clc;
```

```
q_array=[0,50,150,100,0];%指定起止位置
```

```
t_array=[0,2,4,8,10];%指定起止时间
```

```
v_array=[0,10,20,-15,0];%指定起止速度
```

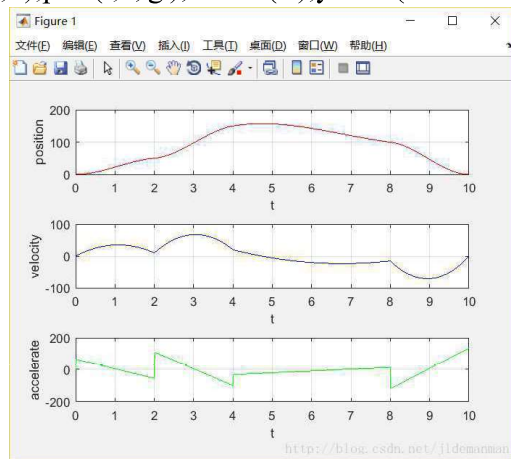
```
t=[t_array(1)];q=[q_array(1)];v=[v_array(1)];a=[0];%初始状态
```

```

for i=1:1:length(q_array)-1;%每一段规划的时间
a0=q_array(i);
    a1=v_array(i);

a2=(3/(t_array(i+1)-t_array(i))^2)*(q_array(i+1)-q_array(i))-(1/
(t_array(i+1)-t_array(i)))*(2*v_array(i)+v_array(i+1));
a3=(2/(t_array(i+1)-t_array(i))^3)*(q_array(i)-q_array(i+1))+(1
/(t_array(i+1)-t_array(i))^2)*(v_array(i)+v_array(i+1));%计算
三次多项式系数
ti=t_array(i)+0.001:0.001:t_array(i+1);
qi=a0+a1*(ti-t_array(i))+a2*(ti-t_array(i)).^2+a3*(ti-t_array(i))
.^3;
vi=a1+2*a2*(ti-t_array(i))+3*a3*(ti-t_array(i)).^2;
ai=2*a2+6*a3*(ti-t_array(i));
t=[t,ti];q=[q,qi];v=[v,vi];a=[a,ai];
End
subplot(3,1,1),plot(t,q,'r'),xlabel('t'),ylabel('position');grid on;
subplot(3,1,2),plot(t,v,'b'),xlabel('t'),ylabel('velocity');grid on;
subplot(3,1,3),plot(t,a,'g'),xlabel('t'),ylabel('accelerate');grid on;

```



总结：三次多项式插值，只要给定离散点位置、速度和时间，就能插补出一段连续平滑的曲线。但是角加速度并不连续，下次为大家介绍高阶多项式插值则可以解决这个问题。

9.2.2 五次多项式插值

三次插值的轨迹函数 $q(t)$ 至少需要满足四个约束条件。两个约束条件是起始点和终止点对应的关节角度；还有两个约束条件，即在起始点和终止点的关节速度要求五次多项式插值，角位移、角速度和角加速度的函数表达式为：

$$\begin{cases} \theta(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 + a_4t^4 + a_5t^5 \\ \dot{\theta}(t) = a_1 + 2a_2t + 3a_3t^2 + 4a_4t^3 + 5a_5t^4 \\ \ddot{\theta}(t) = 2a_2 + 6a_3t + 12a_4t^2 + 20a_5t^3 \end{cases}$$

相对于三次多项式，在起始点和终止点的加速度约束条件

$$\begin{cases} \theta(t_0) = \theta_0 = a_0 \\ \theta(t_f) = \theta_f = a_0 + a_1t_f + a_2t_f^2 + a_3t_f^3 + a_4t_f^4 + a_5t_f^5 \\ \dot{\theta}(t_0) = \dot{\theta}_0 = a_1 \\ \dot{\theta}(t_f) = \dot{\theta}_f = a_1 + 2a_2t_f + 3a_3t_f^2 + 4a_4t_f^3 + 5a_5t_f^4 \\ \ddot{\theta}(t_0) = \ddot{\theta}_0 = 2a_2 \\ \ddot{\theta}(t_f) = \ddot{\theta}_f = 2a_2 + 6a_3t_f + 12a_4t_f^2 + 20a_5t_f^3 \end{cases}$$

解得：

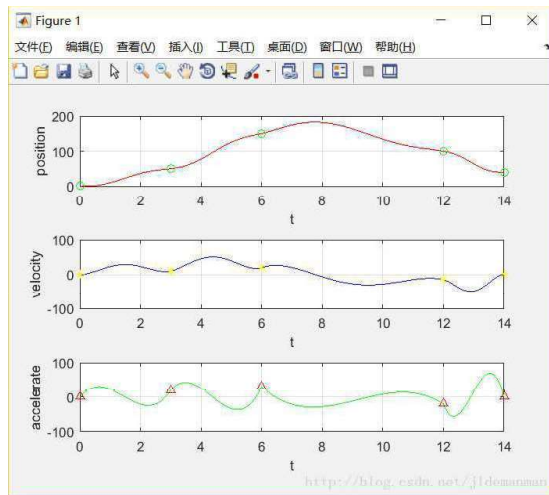
$$\begin{cases} a_0 = \theta_0 \\ a_1 = \dot{\theta}_0 \\ a_2 = \frac{\ddot{\theta}_0}{2} \\ a_3 = \frac{20\theta_f - 20\theta_0 - (8\dot{\theta}_f + 12\dot{\theta}_0)t_f - (3\ddot{\theta}_0 - \ddot{\theta}_f)t_f^2}{2t_f^3} \\ a_4 = \frac{30\theta_0 - 30\theta_f + (14\dot{\theta}_f + 16\dot{\theta}_0)t_f + (3\ddot{\theta}_0 - 2\ddot{\theta}_f)t_f^2}{2t_f^4} \\ a_5 = \frac{12\theta_f - 12\theta_0 - (6\dot{\theta}_f + 6\dot{\theta}_0)t_f - (\ddot{\theta}_0 - \ddot{\theta}_f)t_f^2}{2t_f^5} \end{cases}$$

matlab 代码实现

```
clear;
clc;
q_array=[0,50,150,100,40];%指定起止位置
t_array=[0,3,6,12,14];%指定起止时间
v_array=[0,10,20,-15,0];%指定起止速度
a_array=[0,20,30,-20,0];%指定起止加速度
t=[t_array(1)];q=[q_array(1)];v=[v_array(1)];a=[a_array(1)];%
初始状态
for i=1:length(q_array)-1;%每一段规划的时间
T=t_array(i+1)-t_array(i)
a0=q_array(i);
a1=v_array(i);
a2=a_array(i)/2;
a3=(20*q_array(i+1)-20*q_array(i)-(8*v_array(i+1)+12*v_array(i))*T-(3*a_array(i)-a_array(i+1))*T^2)/(2*T^3);
a4=(30*q_array(i)-30*q_array(i+1)+(14*v_array(i+1)+16*v_array(i))*T+(3*a_array(i)-2*a_array(i+1))*T^2)/(2*T^4);
a5=(12*q_array(i+1)-12*q_array(i)-(6*v_array(i+1)+6*v_array(i))*T-(a_array(i)-a_array(i+1))*T^2)/(2*T^5);%计算五次多
```

项式系数

```
ti=t_array(i):0.001:t_array(i+1);
qi=a0+a1*(ti-t_array(i))+a2*(ti-t_array(i)).^2+a3*(ti-t_array(i)).^3+a4*(ti-t_array(i)).^4+a5*(ti-t_array(i)).^5;
vi=a1+2*a2*(ti-t_array(i))+3*a3*(ti-t_array(i)).^2+4*a4*(ti-t_array(i)).^3+5*a5*(ti-t_array(i)).^4;
ai=2*a2+6*a3*(ti-t_array(i))+12*a4*(ti-t_array(i)).^2+20*a5*(ti-t_array(i)).^3;
t=[t,ti(2:end)];q=[q,qi(2:end)];v=[v,vi(2:end)];a=[a,ai(2:end)];
End
subplot(3,1,1),plot(t,q,'r'),xlabel('t'),ylabel('position');hold
on;plot(t_array,q_array,'o','color','g'),grid on;
subplot(3,1,2),plot(t,v,'b'),xlabel('t'),ylabel('velocity');hold
on;plot(t_array,v_array,'*','color','y'),grid on;
subplot(3,1,3),plot(t,a,'g'),xlabel('t'),ylabel('accelerate');hold
on;plot(t_array,a_array,'^','color','r'),grid on;
```



总结: 相对于三次多项式插值, 加速度也是平滑的曲线, 并没有出现跳变的情况。

在机器人系统中, 单纯的多项式规划存在两个非常严重的问题:

1. 没有匀速段, 无法根据期望速度提供匀速控制, 而在大部分机器人应用中, 对加工的速度控制都是有要求的。


2. 次数越高的多项式, 加速过程越慢, 整个运动过程中的平均速度越小, 影响效率。

教 案

机器人原理及应用 课 20 讲

主讲人 李阿为 王鹏

课题	工业机器人系统集成与典型应用
目的任务	1.了解工业机器人系统集成基础知识; 2.掌握工业机器人系统集成工艺方案设计流程; 3.系统分析工业机器人系统集成典型应用案例。
重点难点	重点: 工业机器人系统集成典型应用案例分析 难点: 1.机器人运动学方程建立; 2. 工业机器人系统集成工艺方案设计流程;
教学方法	开放实验、课堂讲授、课堂互动讨论
使用教具	PPT, 校企合作案例
备课时间	2020年2月10日
上课时间	2020年5月5日

主讲教师(签字): 

课程负责人(签字): 

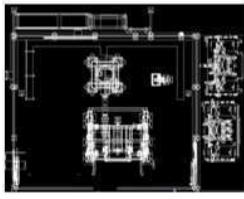
2020年2月24日

教学基本方案

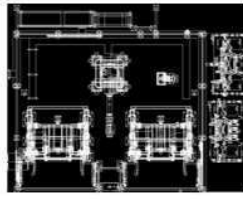
授课章节：第9章 工业机器人系统集成与典型应用	
<p>教学目的及要求：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 了解工业机器人系统集成基础知识； 2. 掌握工业机器人系统集成工艺方案设计流程； 3. 系统分析工业机器人系统集成典型应用案例。 	
<p>教学重点：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 工业机器人系统集成工艺方案设计流程工件分析。 2. 工业机器人系统集成工艺方案设计流程节拍分析。 3. 工业机器人系统集成工艺方案设计流程layout分析 	
<p>教学难点：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 如何系统讲述工业机器人系统集成工艺方案设计流程。 2. 工业机器人系统集成典型应用案例分析。结合汽车产线系统讲解设计工艺方案流程。 	
<p>教学步骤及内容：</p> <p>一、结合工业机器人系统集成与中国制造2025引入课程思政</p> <p>1. 工业机器人系统集成简介</p> <p>举例说明与视屏展示</p> <p>2. 中国制造2025提出新要求</p> <p>举例说明</p> <p>二、工业机器人系统集成工艺方案设计流程</p> <p>1. 工艺方案前期信息接收与整理（结合典型案例系统讲解）</p> <p>2. 工艺方案项目确认（提出多种可行工作站方案，辅助案例分析）</p> <p>3. 工件系统分析、时序分析、layout分析、成立性验证—仿真分析 结合典型案例详细讲解4项的方法、注意事项</p> <p>4. 制作设备清单</p> <p>5. 制作投标方案</p> <p>6. 项目整体方案仿真</p> <p>三、思考新型工艺技术</p> <p>1. 典型案例汽车产线集成点焊新工艺思考</p> <p>举例说明与讨论</p> <p>2. 典型案例汽车产线集成滚边新工艺思考</p> <p>举例说明与讨论</p>	<p>旁批栏：</p> <p>思政元素：</p> <p>提高工业生产质量与效率是社会主义发展需求，也是我们需要系统思考的重要问题。加强工业机器人系统集成是强国的一个突破口。</p>

教学内容	教学设计
<p>一、工业机器人系统集成</p> <p>1. 工业机器人系统集成简介</p> <p>工业机器人系统集成商处于机器人产业链的下游应用端，为终端客户提供应用解决方案，负责工业机器人应用二次开发和周边自动化配套设备的集成，是工业机器人自动化应用的重要组成。</p> <p>2. 工业机器人发展模式：工业机器人产业化过程中，可以归纳为三种不同的发展模式，即日本模式、欧洲模式和美国模式。</p> <p>3. 工业机器人集成产业应用方向：主要分汽车工业行业和一般工业行业。一般工业中按照应用分为焊接、机床上下料、物料搬运码垛、打磨、喷涂、装配等。</p> <p>4. 中国制造 2025（思政元素）</p> <p>李克强在工业和信息化部座谈会上说：传统的“MADE IN CHINA”我们还要做，但“中国制造 2025”的核心，应该是主打“中国装备”。</p> <p>二、工业机器人系统集成工艺方案设计流程</p> <p>1. 前期信息接收与整理</p> <p>工艺方案制作前，需与客户进行交流，了解前置信息，主要包含以下几项：</p> <ul style="list-style-type: none"> (1) 工件信息（含 FLOW CHART 及结构树, 如下图） (2) 车型信息（几平台，几车型） (3) 节拍信息（产能） (4) 规划用地 (5) 切换形式（随机切换，批量切换） (6) 切换时间 (7) 方案类型（新作 OR 改造） (8) 其它（品牌要求，其它特殊要求等） <div data-bbox="240 1429 1107 1765" data-label="Diagram"> </div> <p>2. 项目确认</p> <p>通过前面的信息整理，可对项目的主要方向进行一定的了解。接下来需要对项目的细节进行更进一步的确认</p> <p>确认本次项目的实现形式：手工线，工作站，线体</p> <p>若是手工线形式，向客户了解上件时间有无标准。焊接时间有无标准，是否能现场进行调查等。若是工作站形式，向客户了解进一步的实现方案，</p>	

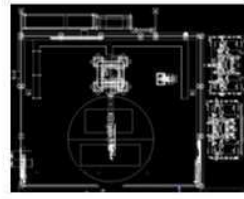
主要工作站实现方式有以下几种可供客户挑选：



单RB单夹具工位：适用于节拍较长的项目



单RB双夹具工位：适用于节拍较短的项目

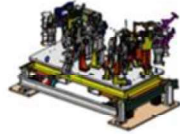


单RB转台工位：适用于节拍较短，使用面积较小的项目

若采用工作站形式，需进一步跟客户确认工作站的切换形式，主要有以下几种：



夹具+固定定位机构
--卡斯马/爱机



夹具+举升定位机构



转台+切换小车



转台+夹具库

3. 工件分析

对工件进行基础分析，系统分析本次工件包含的工艺。

例：广汽乘用车宜昌工厂：

地板分总成主要包含工艺为：点焊，螺柱焊，手工涂胶；

地板总成主要包含工艺为：点焊；

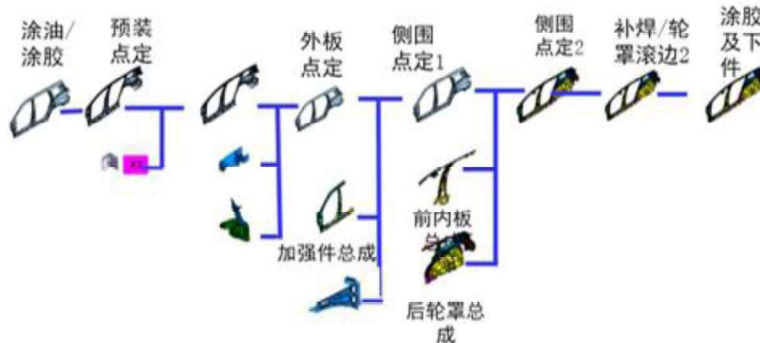
侧围线主要包含工艺为：点焊，螺柱焊，涂胶，轮罩滚边；

顶盖线主要包含工艺为：点焊，涂胶，滚边；

传统白车身工艺主要有以下几种：点焊，弧焊，涂胶，滚边，螺柱焊，凸焊，激光焊，打磨，打刻，冲孔，铆接，自动拧紧；

车身主要工艺主要有以下几种：铝点焊，SPR（自冲铆接技术），FDS（热熔自攻铆接技术）。

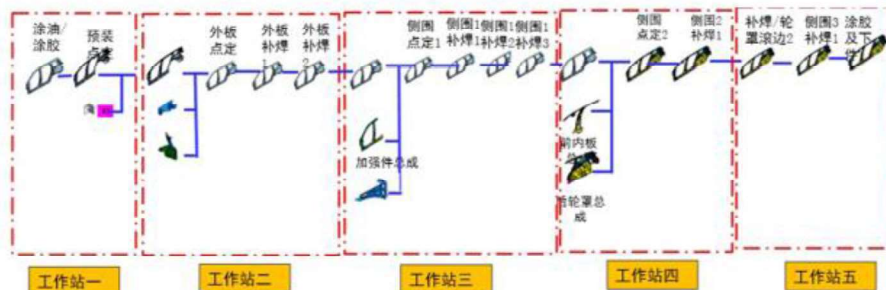
整理了各个线体的工艺后，将各个工艺进行量化--即包含多少个焊点、涂胶长度 和种类是多少、滚边长度是多少等，用于后期分序和计算节拍。经过对工件的工艺进行分析后，开始对工件的上件顺序进行分析。如广汽乘用车宜昌工厂侧围线，经初步对工件分析，将工件的上件顺序初步的结构树，根据工艺方案的深入检讨会持续进行更新如下：



4. 时序分析

根据结构树，将每一序的焊点数量进行整理。并进行初步的时序计算，大致算出一个工位能够焊接的焊点数量大概为多少。（初步设定每个点定工位可同时焊接的机器人数量大约为4~6个）

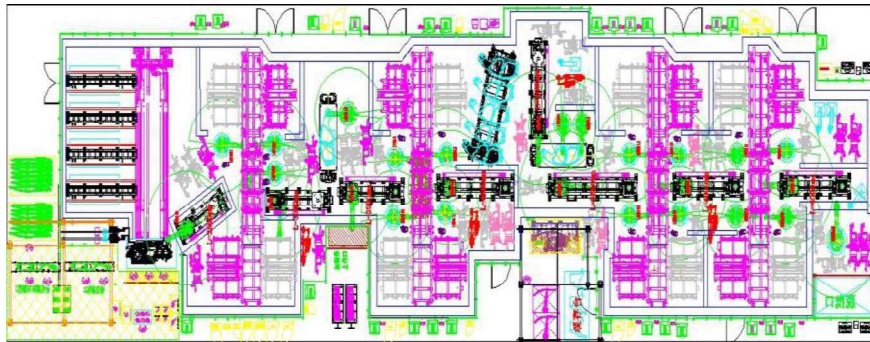
若一序无法将焊点焊完，则需要适当增加增打工位，宜昌工厂侧围线经最终检讨。



5. layout 分析

Layout 规划时需注意以下几点：

- (1) 规划需在客户指定的范围内，若指定的范围无法实现，需及时与客户交流确认；
- (2) 规划时需预留空间供点检，维修用；
- (3) 线体与线体之间的规划需预留物流通道；
- (4) 在 layout 中需注明机器人的应用情况（焊接，搬运，滚边等）；
- (5) 在上件口出需布置相应的料架，料框；
- (6) 需注明地坑，预埋件的特殊标记；
- (7) 线体两侧都需设置安全门，避免操作者只能从一侧进入线体的情况；
- (8) 注意水汽站的位置，需考虑到工厂的水汽管位置进行最优选择；
- (9) 上下件口需按照客户的安全等级要求设置相应的安全元件。



Layout 主要包含的内容有：

上件台，夹具库，机器人7轴，固定点焊枪，焊枪修磨器，抓手放置架，中转台，积放链，料架，电气控制柜，水汽站，安全门，钢结构等。

6. 成立性验证—仿真分析

为了验证此方案的可行性，需要对此方案的重要工位/难点工位进行成立性的验证，即进行仿真分析。仿真分析主要分析内容为一下几项：

- (1) 焊点可达性分析（含点焊，弧焊，涂胶，滚边等）；
- (2) 搬运可达性分析；
- (3) 运动过程干涉性分析；
- (4) 机器人负载分析；

(5) 其它。

7. 制作设备清单

设备清单一般以工位为单位进行制作，最终汇总成整体的清单。若客户有特殊要求则以客户要求为准。

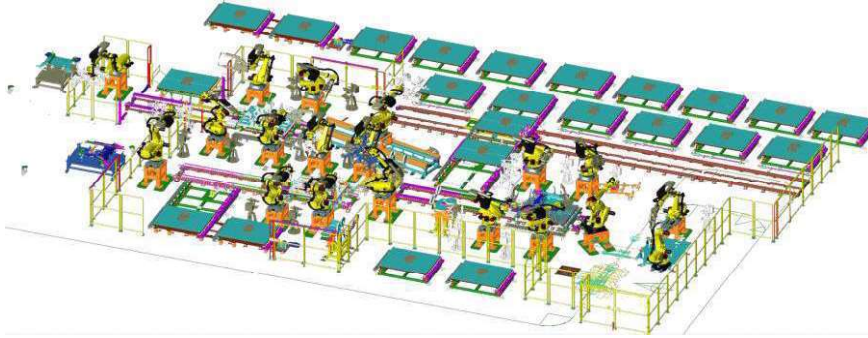
8. 制作投标方案

检讨完以上工件，时序，layout，设备清单便可开始制作投标方案。

- (1) 对项目整体进行概述；
- (2) 对项目整体 layout 进行说明；
- (3) 对 layout 中的工位进行说明；
- (4) 对项目流程进行整体说明；
- (5) 对每个工位进行详细说明；
- (6) 完成了投标方案的制作。

9. 项目仿真整体截图

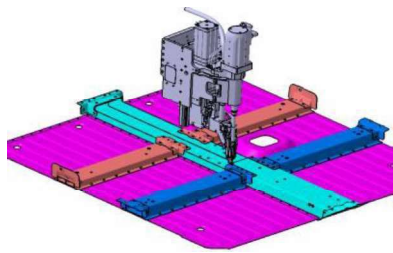
项目承接后，由设计按照工艺方案的规划对项目进行设计工作，后续仿真进行整体最终仿真确认，下面为仿真线体的整体截图。



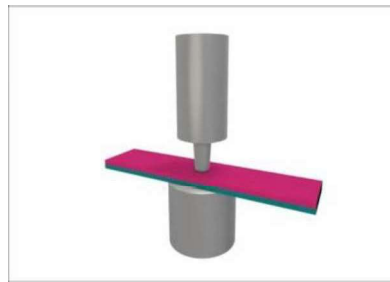
三、思考新型工艺技术

1. 复合材料连接工艺(FDS、Clinch):

一般运用于连接较薄的钣金件，如侧围外覆盖件与内骨架件的连接，可以参考以下方案。



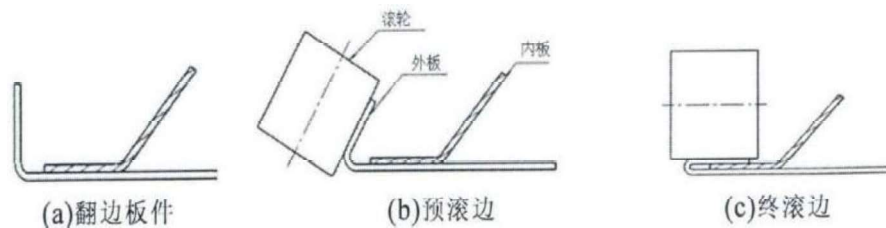
FDS



Clinch

2. 滚边工艺

主要是解决车身外覆盖件内外板的连接技术；广泛用于四门二盖等车身外观件的成型工艺。



(a)翻边板件

(b)预滚边

(c)终滚边

2019-2020-2学期“机器人原理及应用”学生评教记录

序号	学期	开课单位	课程名称	教师工号	教师姓名	班级名称	评价时间	学生评教分数
1	2019-2020-2	机械工程学院	机器人原理及应用	200907002	王鹏	机器人工程181	2020-06-18 22:14:36.0	100
2	2019-2020-2	机械工程学院	机器人原理及应用	200907002	王鹏	机器人工程182	2020-06-18 12:47:56.0	100
3	2019-2020-2	机械工程学院	机器人原理及应用	200907002	王鹏	机器人工程182	2020-06-18 13:23:42.0	100
4	2019-2020-2	机械工程学院	机器人原理及应用	200907002	王鹏	机器人工程182	2020-06-18 20:08:27.0	100
5	2019-2020-2	机械工程学院	机器人原理及应用	200907002	王鹏	机器人工程182	2020-06-17 17:04:38.0	100
6	2019-2020-2	机械工程学院	机器人原理及应用	200907002	王鹏	机器人工程181	2020-06-17 23:10:54.0	100
7	2019-2020-2	机械工程学院	机器人原理及应用	200907002	王鹏	机器人工程181	2020-06-17 23:30:26.0	100
8	2019-2020-2	机械工程学院	机器人原理及应用	200907002	王鹏	机器人工程182	2020-06-17 23:29:41.0	100
9	2019-2020-2	机械工程学院	机器人原理及应用	200907002	王鹏	机器人工程181	2020-06-17 22:11:36.0	100
10	2019-2020-2	机械工程学院	机器人原理及应用	200907002	王鹏	机器人工程181	2020-06-17 19:09:39.0	100
11	2019-2020-2	机械工程学院	机器人原理及应用	200907002	王鹏	机器人工程182	2020-06-19 00:28:23.0	100
12	2019-2020-2	机械工程学院	机器人原理及应用	200907002	王鹏	机器人工程182	2020-06-19 20:41:29.0	100
13	2019-2020-2	机械工程学院	机器人原理及应用	200907002	王鹏	机器人工程181	2020-06-18 12:47:46.0	100
14	2019-2020-2	机械工程学院	机器人原理及应用	200907002	王鹏	机器人工程182	2020-06-18 20:21:47.0	100
15	2019-2020-2	机械工程学院	机器人原理及应用	200907002	王鹏	机器人工程182	2020-06-20 07:58:02.0	100
16	2019-2020-2	机械工程学院	机器人原理及应用	200907002	王鹏	机器人工程181	2020-06-17 18:42:19.0	100
17	2019-2020-2	机械工程学院	机器人原理及应用	200907002	王鹏	机器人工程182	2020-06-19 00:29:02.0	100
18	2019-2020-2	机械工程学院	机器人原理及应用	200907002	王鹏	机器人工程182	2020-06-18 17:55:42.0	100
19	2019-2020-2	机械工程学院	机器人原理及应用	200907002	王鹏	机器人工程182	2020-06-18 10:19:03.0	100
20	2019-2020-2	机械工程学院	机器人原理及应用	200907002	王鹏	机器人工程182	2020-06-29 16:16:58.0	100
21	2019-2020-2	机械工程学院	机器人原理及应用	200907002	王鹏	机器人工程182	2020-06-17 20:40:35.0	100
22	2019-2020-2	机械工程学院	机器人原理及应用	200907002	王鹏	机器人工程182	2020-06-17 20:51:02.0	100
23	2019-2020-2	机械工程学院	机器人原理及应用	200907002	王鹏	机器人工程182	2020-06-18 09:51:02.0	100
24	2019-2020-2	机械工程学院	机器人原理及应用	200907002	王鹏	机器人工程182	2020-06-17 19:14:45.0	100
25	2019-2020-2	机械工程学院	机器人原理及应用	200907002	王鹏	机器人工程182	2020-06-19 09:36:38.0	100
26	2019-2020-2	机械工程学院	机器人原理及应用	200907002	王鹏	机器人工程182	2020-06-19 00:32:14.0	100
27	2019-2020-2	机械工程学院	机器人原理及应用	200907002	王鹏	机器人工程181	2020-06-17 07:38:20.0	100
28	2019-2020-2	机械工程学院	机器人原理及应用	200907002	王鹏	机器人工程182	2020-06-17 20:02:17.0	100
29	2019-2020-2	机械工程学院	机器人原理及应用	200907002	王鹏	机器人工程182	2020-06-17 19:21:20.0	100
30	2019-2020-2	机械工程学院	机器人原理及应用	200907002	王鹏	机器人工程181	2020-06-18 09:14:58.0	99.4
31	2019-2020-2	机械工程学院	机器人原理及应用	200907002	王鹏	机器人工程181	2020-06-17 23:32:01.0	98.7
学期平均分								99.94

教学质量监控与评价处
2021年5月7日

西安航空学院课堂教学质量评价表（普通课）

督导、领导、同行听课用表



任课教师	王鹏	类别: <input checked="" type="checkbox"/> 专 <input type="checkbox"/> 兼 <input type="checkbox"/> 聘	职称	副教授	开课单位	机械工程学院
课程名称	机器人原理及应用					
授课题目	工业机器人运动学一般问题					
授课时间	2020年4月2日 星期四 第三小节			授课地点	线上授课	
授课班级	机器人181		应到学生: 32	实到学生: 32	到课率: 100%	
一级指标	二级指标			分值	得分	
教学态度 (20分)	1. 爱岗敬业, 为人师表, 师德师风良好。			10	10	
	2. 仪态端庄大方, 言行文明。			2	2	
	3. 教案书写认真规范, 教学资料齐全。			2	2	
	4. 严格要求, 善于管理。			3	3	
	5. 遵守教学规章制度, 按时上下课。			3	3	
教学内容 (30分)	1. 概念准确, 重点突出, 条理清晰。			10	10	
	2. 教学组织合理, 内容充实, 深度、广度适宜。			10	10	
	3. 内容娴熟, 能脱稿讲解。			10	10	
教学方法 (20分)	1. 结合课程特点, 发挥课程育人价值, 引导学生树立正确的世界观、人生观和价值观。			4	4	
	2. 普通话教学, 语言生动流畅, 富有激情。			4	4	
	3. 板书工整、规范, 合理应用多媒体课件。			4	3	
	4. 因材施教, 教学方法灵活多样, 善于利用信息化教学手段。			4	4	
	5. 注重师生互动, 善于理论联系实际。			4	4	
教学效果 (30分)	1. 教学体现 OBE 理念 (基于学习产出的教育模式)。重点关注学生学习效果, 根据反馈调整教学方法, 促进学生达成毕业目标。			10	10	
	2. 能够调动学生学习的主动性、积极性。			10	10	
	3. 课堂纪律好, 气氛活跃, 学生能够认真听讲, 积极思考, 大胆发言。			10	10	
总分				100	99	

听课记录

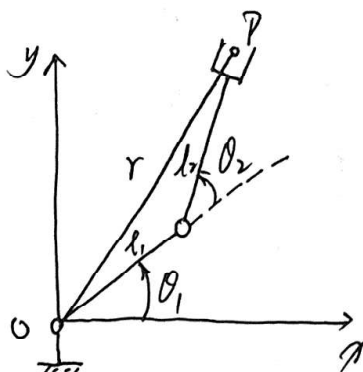
5. 工业机器人运动学.

5.1 一般问题.

研究对象:

核心问题:

例: 二自由度机器人手爪



正运动学: 已知几何参数、关节角矢量, 求位置、姿态.

逆运动学: 已知几何参数、期望位姿, 能否达到预期位姿.

总体评价

遵守课堂管理制度, 按时上下课, 要求严格; 概念准确, 条理清晰; 课堂中融合思政教育; 教学过程中理论联系实际, 能体现 OBE 理念, 充分调动学生积极性, 气氛活跃。

问题与建议

1. 新开课程进一步优化 PPT;
2. 注意把握课堂节奏.

是否与授课教师沟通交流: 是 否

是否与学生沟通交流: 是 否

听课人类别: 校领导 职能部门领导 院(部)领导 教研室主任 教师

听课人单位: 机械 教研室: 办公室 听课人(签字): 王奇利

学校政治审查意见

“机器人原理及应用”申报本次省级线下一流课程，课程内容及上传的申报材料无危害国家安全、涉密及其它不适宜公开传播的内容，思想导向正确，不存在思想性问题。

该课程团队负责人及成员思想上进，政治立场坚定，遵纪守法，无违纪违法行为，不存在师德师风、学术道德等问题，五年内未出现过重大教学事故。

中国共产党西安航空学院委员会

2021年5月15日



学校教学工作委员会对课程的评价意见

“机器人原理及应用”课程遵循学校办学定位和人才培养理念，重点培养学生在工业机器人应用方面的能力，同时树立学生的民族自豪感，培养学生精益求精的大国工匠精神和实事求是的科学精神，能力目标和素质目标定位准确。

“机器人原理及应用”课程主要体现工业机器人基本概念和工作原理，是机器人工程专业的一门重要专业核心课程，课程团队教师通过构建理实一体的教学体系，采用雨课堂等现代教学手段在专业课程教学方面达到协同育人成效。课程整体上符合线下一流课程的建设标准。同意推荐“机器人原理及应用”课程参评线下一流课程。

西安航空学院教学工作委员会

2021年5月15日

委员签字：

张进 罗焱 敏学



普通高等院校“十三五”规划教材
普通高等院校“十二五”规划教材
普通高等院校机械类精品教材

顾问 杨叔子 李培根

INDUSTRIAL ROBOT



工业机器人

(第四版)

主编 韩建海



教案 | 教学课件 | 习题解答 | 视频



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

内 容 简 介

本书共8章,内容包括工业机器人的基本概念和基础理论、工业机器人的机械结构、运动学和动力学分析、控制技术、与机器人相关的传感技术、轨迹规划、机器人语言,以及工业机器人在制造业和非制造业中的应用。每章均附有习题。

本书可作为地方普通工科院校的机械工程及其自动化、机械设计制造及其自动化、机械电子工程等机械类专业的教材,也适合作为自学者的自学用书及工程技术人员的培训用书,对于从事机器人技术研究工作的科技人员也有一定的参考价值。

为了方便教学,本书还提供了部分习题的参考答案,读者可通过在微信端扫码获取(二维码资源使用说明见书末)。此外,本书还配套了免费教案教学课件及其他教学资源,读者可以向华中科技大学出版社机械分社索取(电话:027—87544529,邮箱:279771046@qq.com)。

图书在版编目(CIP)数据

工业机器人/韩建海主编. —4版. —武汉:华中科技大学出版社,2019.7
普通高等院校“十三五”规划教材 普通高等院校机械类精品教材
ISBN 978-7-5680-5389-1

I. ①工… II. ①韩… III. ①工业机器人-高等学校-教材 IV. ①TP242.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 126033 号

工业机器人(第四版)

韩建海 主编

Gongye Jiqiren

策划编辑:俞道凯

责任编辑:姚同梅

封面设计:原色设计

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

电话:(027)81321913

武汉市东湖新技术开发区华工科技园

邮编:430223

录 排:武汉市洪山区佳年华文印部

印 刷:武汉中科兴业印务有限公司

开 本:787mm×960mm 1/16

印 张:15 插页:2

字 数:321千字

版 次:2019年7月第4版第2次印刷

定 价:39.80元



华中出版

本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究