第 1 章 概 述

迄今为止，机器人及有关控制技术已经成功应用于各行各业。在汽车制造业，机器人占工业机器人总量的一半，如由机械臂将钢板送入冲压机等生产设备，既稳定了产品质量，又避免了工伤事故；在电子行业，电路的贴片、分捡等都可由机器人来完成；在塑胶和铸造行业，机器人可以在注塑机或砂型机旁高强度、高精度、高效率地完成作业；在冶金和化工行业机器人的应用也较为广泛；在食品行业，自动午餐机、牛肉切割机器人等也显示了巨大的威力；在玻璃铸造业，无论是平板玻璃，还是空心玻璃，机器人作业都是较好的选择；即使在家电行业也离不开机器人，如销售量较大的地板清洁机器人；在教育行业，许多大学开设了机器人工程专业，相应的科研机构也在快速发展中。这对机器人教育的研究提出了极大的挑战，同时也为机器人教育创造了难得的发展机遇。

1.1 机 器 人 学

机器人学是一门综合性的学科，包含材料学、力学、机械设计、计算机视觉、语音控制学和传感器技术等。从研究对象上来定义，机器人学是对能代替人类完成体力活动和决策制定的机器人的研究。多年来，人们都致力于寻求自己的替身，使其在各种情况下能模仿人类与周围环境进行互动。为达到这一目标，人类在机器人学领域上坚持不懈地进行相关研究，这些努力也使机器人学取得了相应的进展，并为后续的研究提供了重要的依据。

虽说机器人学具有深厚的文化基础，但它仍然是一门年轻的学科，进入大学课堂也是近几十年的事情。由于涉及很多学科，至今机器人学并没有形成比较完整的体系，不同的专业从不同的角度都对机器人学这门学科进行了研究，也做出了各自的贡献。由于近年来各国智能制造的兴起，机器人学也受到了人们的格外关注，对于有兴趣研究或从事机器人设计的学生，从三维空间理解机械臂的运动学、静力学、动力学、控制及其路径规划是必不可少的学习内容。根据目前课堂的实践情况来看，还是有不少的学生反映机器人学或工业机器人的有关知识难以理解和掌握。为了解决这一问题，我们需要回到问题的本质上，从新的角度来研究机器人学，提供一种切实有效的学习方法和学习模式。

1.2 机器人机械结构

机械结构是机器人的重要组成部分。机器人可以分为具有移动基座的移动机器人和具有固定基座的机械臂两大类。其中，具有移动基座的机器人样式比较多，如轮式、履带式、步

行机器人等；而具有固定基座的机械臂种类也较多，根据机械臂的自由度，可以分为 4 自由度、5 自由度和 6 自由度机械臂等。虽然机器人学涉及的学科很广，如机械、电子、信息通信、计算机科学及自动控制等，但不论是具有固定基座的机械臂，还是具有移动基座的移动机器人，其控制过程的建模与规划都是机器人学的主题。迄今为止，各种各样的机器人已经获得了成功的实际应用，如机械臂的机械结构由一系列连杆形成开式运动链（串联）或闭式运动链（并联），通过转动或滑动关节（其中每一个关节提供一个自由度），加上控制器和执行软件等，组装成各种工业机器人。图 1.1～图 1.4 所示为一些工业机器人，其中，图 1.1 为典型的 SCARA 串联式机械臂，图 1.2 为典型的 DELTA 并联式机械臂，图 1.3 和图 1.4 为典型的串联式 6 轴工业机械臂。它们的具体结构读者可以从多种渠道进行了解。实际上，许多移动机器人的建模都是以机械臂的运动学和动力学为基础的，所以，有关机械臂的建模与控制理论就成为机器人学的精髓。

图 1.1　EPSON SCARA 机器人

资料来源：https://global.epson.com/products/robots/

图 1.2　ABB IRB DELTA 360 机器人

资料来源：https://new.abb.com/

图 1.3　ABB IRB 4600 机器人

资料来源：https://new.abb.com/

图 1.4　KR QUANTEC KUKA 机器人

资料来源：http://kuka.robot-china.com/

1.3 机器人驱动器

机器人驱动器是用来使机器人发出动作的动力机构。机器人驱动器可以将电能、液压能和气压能转化为机器人的动力。常见的机器人驱动器主要有以下几种：电气驱动器，包括直流伺服电动机、步进电动机和交流伺服电动机；液压驱动器，可以分为电液步进马达和油缸；气动驱动器，包括气缸和气动马达；特种驱动器，包括压电体、超声波马达、橡胶驱动器和形状记忆合金等。

各种类型的驱动器都有各自的优缺点，总体而言，驱动器具有以下特点：

1）惯量低

工业机器人的最大特点是空间移动，而移动就难免与零部件的惯性发生矛盾，尤其是加速和快速地移动情况。这就要求安装于机械臂上的所有部件必须考虑惯性对机械臂的运动特性影响，尽可能在设计阶段就减少零部件的惯性对运动控制的负面影响。

2）功重比大

功重比大要求驱动电动机和传动机构的输出功率大并且效率高，而驱动机构本身所占的重量要小。这一点与传统的机电一体化装备设计有很大的不同，因为安装于机械臂上的许多驱动机构是随着机器人一起移动的，没有足够的功重比将会造成运动机构的传动效率大大降低。

3）能承受过载和传递脉冲转矩

工业机器人的工作环境和要求完成的任务是变化的，具有很大的不确定性，所以工业机器人必须具有足够的承受过载和传递脉冲转矩的能力，比如有些安装任务要求机器人能够传递脉冲转矩，以完成特殊的组装工艺。

4）能产生大的加速度

工业机器人的运动特性是执行器在机器人工作空间各种位置和姿态的反复移动和转换，这就要求机器人必须有足够的加速和减速能力。

5）速度范围大

为了提高社会经济效益，要求工业机器人的应用范围广并且适应性强，而速度范围大是工业机器人最基本的性能要求。

6）能高精度轨迹追踪和高精度定位

随着工业 4.0 和工业机器人技术的成熟和快速发展，越来越多的行业都开始应用工业机器人进行有关的作业，反过来也要求工业机器人的动态性能和控制精度越来越高。

在实际工业机器人的设计和应用中，选择合适的驱动器是关键的一步，需要从位置精度、可靠性、操作速度和成本等多方面来考虑。

1.4 机器人传感器

为了检测作业对象、环境或机器人与它们的关系，一般在机器人上安装传感器进行定位和控制，实现类似人类的感知作用，这对自动化生产乃至整个智能制造行业都具有重要的意

义。机器人传感器分为内部传感器和外部传感器，是将机器人对内部和外部环境感知的物理量变换为电量输出的装置。

1.4.1 内部传感器

内部传感器是用来检测机器人本身状态的传感器，一般安装在机器人自身中，包括位置传感器、速度传感器、加速度传感器和力觉传感器等。

1）位置传感器

位置传感器也称为位移传感器，它的功能在于把检测出的位移量转换成电信号。位移量可以为直线移动，也可以为角度转动。比较常用的位置传感器有电位式位移传感器、光电编码器、增量式编码器等。

2）速度传感器

速度传感器用于测量机器人关节平移运动和旋转运动的速度。比较常用的速度传感器有测速发电机和增量式光电编码器等。

3）加速度传感器

加速度无法直接测量，通常是将其通过质量块转化为对力、应变或位移的测量，从而得到加速度的值。较常见的加速度传感器有应变片加速度传感器、伺服加速度传感器、压电感应加速度传感器等。

4）力觉传感器

力觉传感器是用来检测机器人的手臂和手腕所产生的力或其所受反力的传感器。手臂部分和手腕部分的力觉传感器可用于控制机器人手所产生的力，在费力的工作中及限制性作业、协调作业等方面是有效的，特别是在镶嵌类的装配工作中，它是一种特别重要的传感器。扭矩传感器是一种可以让机器人知道力的传感器，可以对机器人手臂上的力进行监控，根据数据分析，对机器人接下来的行为进行指导。

1.4.2 外部传感器

外部传感器是用来检测机器人所处环境及目标状态特征的传感器，使机器人和环境发生交互作用，包括碰撞传感器、安全传感器、视觉传感器和语音传感器等。下面简要介绍几种机器人传感器，具体内容可参考相关资料。

1）碰撞传感器

机器人最大的要求就是安全，要营造一个安全的工作环境，就必须让机器人识别什么是不安全。使用碰撞传感器，可以让机器人理解自己碰到了某种东西，并且发送一个信号暂停或者停止机器人的运动。

2）安全传感器

与碰撞传感器不同，安全传感器可以让工业机器人感觉到周围存在的物体，避免机器人与其他物体发生碰撞。

3）视觉传感器

视觉传感器目前有二维视觉传感器和三维视觉传感器。二维视觉传感器主要是一个摄像

头，它可以完成对物体运动的检测及定位等功能。二维视觉传感器已经出现了很长时间，如许多智能相机可以配合协调工业机器人的行动路线，根据接收到的信息对机器人的行为进行调整。

三维视觉传感器逐渐兴起。三维视觉系统必须具备两台摄像机且在不同角度进行拍摄，这样物体的三维模型可以被检测识别出来。相比于二维视觉传感器，三维视觉传感器可以更加直观地展现环境事物。

4）语音传感器

语音信号识别是比较成熟的技术。语音传感器利用一个语音识别系统，首先对语音信号进行识别，然后对结果进行编码和破译等，最终转换成相应的电信号，从而达到语音传感的目的。利用语音传感器有助于实现人机对话。

除了上述传感器以外，机器人传感器还有其他的许多特殊功能的传感器，如焊接缝隙追踪传感器（要想做好焊接工作，就需要配备一个这样的传感器）、触觉传感器等。传感器为工业机器人带来了各种“感觉”，这些“感觉”帮助机器人变得更加智能化，工作精确度更高。

1.5 机器人控制

控制的目的是使被控对象产生控制者所期望的行为方式，在工业机器人学中就是使机械臂通过准确、重复的运动，完成指定的任务。机器人控制系统是机器人的“大脑”，是决定机器人功能和性能的主要因素。例如，工业机器人控制系统，其主要任务就是控制工业机器人在工作空间中的运动位置、姿态、轨迹、操作顺序及动作的时间等。事实上，机器人控制系统是一个与机构学、运动学和动力学密切相关的、耦合紧密的、非线性和时变的多变量控制系统，一般由计算机和伺服控制器组成。

对于机器人控制而言，我们需要知道系统动态特性的数学描述，即建立数学模型。这一模型能描述系统输入量、输出量及内部各变量之间的关系，从而揭示出系统结构及其参数与其性能之间的内在关系。

1.5.1 二阶线性系统

二阶线性系统是包含两个独立状态变量的动态系统，其数学模型是二阶线性常微分方程。二阶系统的解的形式可由对应传递函数的分母多项式 $P(s)$ 来判别和划分。$P(s)$ 的一般形式为变换算子 s 的二次三项代数式，经标准化后可将代数方程 $P(s)=0$ 作为特征方程，其解有以下 3 种情况：

（1）特征方程有一对不相等的实根，称为过阻尼系统，系统的阶跃响应为非振荡过程。

（2）特征方程有一对复根，称为欠阻尼系统，系统的阶跃响应为衰减的振荡过程。

（3）特征方程有一对相等的实根，称为临界阻尼系统，系统的阶跃响应为非振荡过程。

1.5.2 反馈控制

在机器人控制中，建立高性能控制系统的唯一方法就是利用关节传感器的反馈，这种利

用反馈的控制系统称为闭环控制系统。在机器人系统中，轨迹生成器向控制系统输入我们期望机械臂所有关节达到的位置、速度和加速度信息，闭环控制系统将机械臂的实际输出量检测出来，经过物理转化后再反馈到输入端，与给定值进行比较，并利用比较后的偏差信号，以一定的控制规律产生控制作用，抑制内部或外部扰动对输出量的影响，逐步减小以至消除这一偏差，从而实现要求的控制性能。

反馈控制抑制扰动能力强，对参数变化不敏感，并能获得满意的动态特性和控制精度，但同时也增加了系统的复杂性，如果闭环系统参数的选取不适当，系统可能会产生振荡，甚至失稳而无法正常工作，这是机器人控制系统设计中必须要解决的重要问题。

1.5.3 PID 控制器

PID(proportion，integration，differentiation)控制器由比例单元 P、积分单元 I 和微分单元 D 组成，如图 1.5 所示。通过 k_p，k_i 和 k_d 3 个参数的设定完成控制器的设计，这 3 个参数的大小决定了 PID 控制器比例、积分和微分控制作用的强弱。PID 控制器主要适用于基本线性和动态特性不随时间变化的系统。

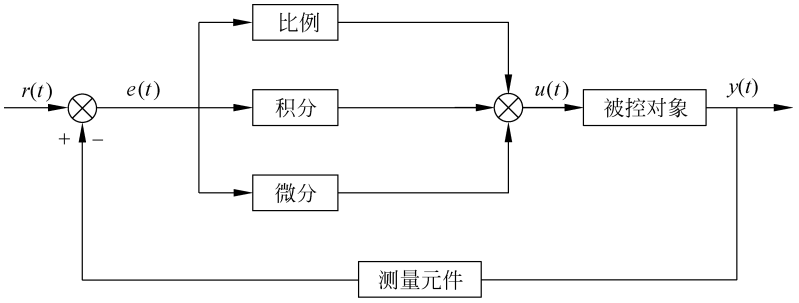

图 1.5 PID 控制器原理图

PID 控制器的输入一般是系统输出与一个参考值的差值，即控制偏差，然后把这个差值用于计算新的控制量，目的是让系统的输出达到或者保持在输入的目标值。

1.5.4 力控制

在机器人应用领域中，利用力传感器作为反馈装置，将力反馈信号与位置控制(或速度控制)输入信号相结合，通过相关的力和位置混合算法，实现力和位置的混合控制技术，简称力控制。力控制是在正确的位置控制基础上进一步的控制内容，其目的是为机器人增加触觉功能。在当前机器人的应用中，力控制一般与视觉技术相结合，共同组成机器人的视觉和触觉功能。

力控制技术主要分为关节力控制技术和末端力控制技术。其中关节力控制指机器人各关节均具备一个力/力矩传感器，而末端力控制指机器人末端装有一个力传感器(1～6 维传感器)。在研究机器人的力控制时，需要分别按照应用项目的工艺要求进行相关的设计和研究。

1.6 机器人路径规划

机器人路径规划是根据其作业任务的要求，计算出预期的运动路径。任务不同，其运动路径也不同。例如，对于抓放作业的机器人，需要描述机械臂的起点和终点（点到点运动）；而对于要完成弧焊作业的机器人，不仅要规定机械臂的起点和终点，还需要指明两点之间的若干中间点（路径点），使其必须沿特定的路径（连续路径）运动。这里所说的“点”，实际上是指在三维空间具有确定位置和姿态的笛卡儿坐标系。我们在使用机器人时，会指定一系列参数，以描述期望的路径。

机器人路径规划分为两种：关节空间规划和笛卡儿空间规划。前者主要涉及关节的位移、速度及加速度，后者主要考虑机械臂末端的位置、姿态及其对时间的导数。

1.7 虚拟实验室

虚拟实验室是指基于虚拟现实技术生成的适于进行虚拟实验的实验系统。虚拟实验室可以是某一现实实验室的真实实现，也可以是虚拟构想的实验室，即虚拟实验室对现实实验室进行模拟。在虚拟实验室中，实验者不但可以体验在真实实验室中进行实验操作的感觉，而且能更直观地获取一些在真实实验室不能直接观察到的实验量。本书后面的章节将会介绍如何将基于 v-rep 的虚拟实验室应用于机器人学的学习中。

仿真是指对一个未知事物或未知现象，在分析其原理后，构建数学模型，将数学模型在仿真环境中进行仿真，之后与真实实验结果对比；如果与真实的实验结果相同，则认为该数学模型和仿真模型正确或相对正确；如果与真实实验结果相差较远，则认为该数学模型和仿真模型不正确。因此仿真是一个从未知到已知探索的过程。

虚拟实验室中的虚拟是指在已经明晰了相关的数学模型是正确无误的情况下，将该数学模型可视化来模拟真实的物体或环境。我们是在知道并且确定了数学模型是正确的或相对正确的情况下，用该数学模型虚拟真实的物理环境。因此虚拟是一个从已知到已知的过程。

仿真和虚拟二者有相同或相似的地方，如到了仿真后期模型逐渐确定，它的一些表现会跟虚拟很像，就会给人一种错觉，即一些商用的仿真软件可以用来当作虚拟工具，这是不准确的，二者其实南辕北辙。以机器人例子来说明，如对机器人运动学模型的参数调整：仿真的参数调整就是调整运动学模型中的参数（如机器人臂长等），这些参数调整都是针对这个运动学模型本身，是为了优化这个运动学模型而进行的参数调整；虚拟的参数调整则是调整这个运动学参数模型对外部环境的一些参数，如起始停止速度、起始停止位置等，而其运动学模型本身是不变的。因为我们认为这个模型是对的和最优的，如果我们再去修改运动学模型，就超出了虚拟实验的范围。

相对于传统实验室，虚拟实验室具有以下优点：

（1）低成本。与传统实验室相比较，学校和教育机构能够在资金、空间和人员配置方面

以更低的运行成本提供相对完善的实验环境。

(2) 多权限。虚拟实验室允许多个学生在同一时间使用同一实验室设备。

(3) 灵活性。虚拟实验室允许学生在不同的时间和不同的地点使用实验设备；不同实验需求的不同组件可以较自由地安装和替换；可以选择性地改变可调参数，进行发散性实验和良性错误实验；可以与新的网络教学方法相结合。

(4) 不可见量可观察性。传统的实验不能观察到某些重要的、位于系统内部且不可观察的量，而在虚拟实验室可以将一些不可观察的量呈现出来，并且弱化一些不重要的、随机的和令人困惑的信息，使结果更加直观；还可以将一些变量之间的关系直观地呈现出来。

(5) 安全性。对于一些特殊的、危险的教学实验环境，虚拟实验是更好的选择。

虚拟实验室具有如下不足：

(1) 触觉信息缺失。虚拟实验室和远程实验室无法提供对于自然、技术和工程学科实验而言很重要的触觉信息，这在一定程度上阻碍了学习过程。

(2) 良性错误事件缺失。在传统实验中，一些良性错误事件，如出现设备故障或出现测量误差，能帮助学生理解一些重要的概念及调整相应的实验策略；而在虚拟实验中，除非进行相关的研究和构建相应的良性错误模型算法，否则不会出现此类良性错误事件。

1.8 机器人应用

机器人目前已经在工业、农业、建筑业、商业、旅游业及国防等领域获得越来越普遍的应用；而对于机器人教学而言，我们的需求在于更适合教学的桌面机器人产品，从这类机器人入手，更有利于进行相关知识的学习。

1.8.1 桌面机器人系列

桌面机器人这个概念是最近几年才真正提出来的，可以看成是一个比较新的分类和领域。这类机器人的主要特点有以下 3 个：

1) 体积小、轻量化

相比于一般的工业机器人，桌面机器人具有体积小、轻量化等特点，它的整体设计非常紧凑，能够很好地实现协同工作，应用在教学上也能更好地为学校所采纳和接受。

2) 性价比高

一般工业机器人会要求非常极致的性能，这同时也会带来高不可攀的售价，对于普通人而言是一个非常高的门槛，也阻碍了很多人对机器人进行更深入的学习。应运而生的桌面机器人在这方面具有很好的优势，其价格低廉，性能也远远超过了教学需求。

3) 实用性强

这里所说的实用性是专门针对教学和学习方面的，桌面机器人的所有配件都是通过特殊设计的，它非常小巧，同时也非常易用。现在也有人在桌面机器人上做一些二次开发，使其与一些开源平台相互配合，达到更好的学习和应用效果。

1.8.2 智能制造教学实验系统

当前，全球制造业正加快迈向数字化、智能化时代，智能制造对制造业竞争力的影响越来越大。我们首先需要研究智能制造（或智慧工厂）的基本要素或定义：传统的过程智能化聚集了设计过程、制造计划管理、销售管理、物资管理、供应链管理及人力资源管理，而智能制造还应包括预先研究阶段，产品的运行、服务、维护、检测和客户的意见。显然，产品发展是动态迭代和局部微迭代过程的集合，智能制造模式有利于产品的升级换代，也符合全制造服务周期产品模式。

智能制造的基本要素为包括预研阶段、创新决策、开发与设计、工艺与制造、生产计划与管理、物流与供应、营销交付、运行维护、用户服务与体验、全制造周期效益与绿色评估。可以说符合以上内容的制造模式为智能制造或智慧工厂的基本要求。

然而，从目前的情况来看，智能制造方面的专业人员是相对稀缺的，而人才孵化的责任自然应该由各大高校来承担。我们通过调研得知，智能制造科学是各大高校计划陆续开展的教学内容。智能制造是跨学科、尖端技术和虚拟技术的综合体，传统的教学模式已经不能胜任，以合理的成本研发完备的智能制造教学实验平台及配套教材，并应用于各大高校的有关专业是亟待解决的问题，也是未来教学与职业培训的必备实验室装备。由此可见，智能制造教学实验系统是各大高校急需的教学科研成套装备，有关技术及设备的研发将会具有很大的市场和应用空间。由此可以看到，智能制造教学实验系统是实践工业 4.0 的缩影版本，而相关的建设规范也需要在实践中不断完善。

1.9 机器人操作系统（ROS）

机器人操作系统 ROS（robot operation system）是一个机器人软件平台。它并不是一个独立完整的操作系统，但能为异质计算机集群提供类似操作系统的功能。其中，计算机集群（简称集群）是一种计算机系统，它通过将一组松散集成的计算机软件或硬件连接在一起，来高度紧密地协作完成计算工作。在某种意义上，它可以被看成一台计算机。

ROS 是开源的，它是用于机器人的一种后操作系统，或者说次级操作系统。ROS 提供类似操作系统所提供的功能，主要包含硬件抽象描述、底层驱动程序管理、公用功能的执行、程序间的消息传递、程序发行包管理；它也提供一些工具程序和代码库，用于获取、建立、编写和运行多机整合的程序；ROS 设计的首要目标是在机器人研发领域提高代码的复用概率，ROS 是一种分布式处理框架（又名 Nodes），这种可执行文件能被单独设计，并且运行时松散耦合，这些过程可以封装到数据包（package）和堆栈 ROS 中，以便共享和分发；ROS 还支持代码库的联合系统，使协作也能被分发。上述所有的工作都由 ROS 的基础工具实现。

以上对 ROS 进行了简单的介绍，感兴趣的读者可以参考更专业的书籍和资料。

小　结

作为本书的开篇，本章首先从机器人学的定义开始，简要地介绍了机器人的结构、驱动器、传感器，以及机器人的控制和路径规划等，对目前机器人常用的一些传感器也做了分类介绍；然后介绍了虚拟实验室，并将其与仿真做了对比，进一步说明了虚拟实验室在机器人学中的重要作用；最后介绍了机器人应用，主要针对的是桌面机器人系列，同时结合智能制造引申出智能制造教学实验系统的概念，对应了机器人教学方面的一个发展趋势。

练　习　题

1.1　请给出工业机器人的定义，并说明工业机器人有哪几种分类方法。

1.2　简述工业机器人由哪些子系统构成。

1.3　简要说明 SCARA 和 DELTA 机器人的机械结构及其特点(参见图 1.1 和图 1.2)。

1.4　简要说明 6 自由度工业机械臂的机械结构及其特点(参见图 1.3 和图 1.4)。

1.5　简述工业机器人常用的传感器及其分类。

1.6　简述虚拟和仿真的区别与联系，以及虚拟实验室的优点和缺点。

1.7　简述计算机控制程序在工业机器人设备上的功能和作用。

1.8　随着智能制造的逐步升级，工业机器人的应用受到高度重视，简述你认为在制造业大量应用工业机器人应注意的问题。

1.9　简述智慧工厂作为一个系统工程主要包括哪些单元和功能。

1.10　简述工业机器人控制过程有什么特点。

1.11　工业机器人已经发展为独特形态的机械电子程序一体化的工业设备，简述你认为在未来智慧工厂的应用场景。

1.12　工业机器人仍然是一门正在快速发展的科学和技术，简述你认为工业机器人哪些方面还需要在技术上进行创新或改进。

实　验　题

扫描二维码可以浏览第 1 章实验的基本内容。

1.1　工业机器人初识与组装

我们在学习机器人学这门课程时，需要对工业机器人有一个初步的认识。这个认识不