

第一章 绪论

华东理工大学信息科学与工程学院

卿湘运

2024年1月

1 绪论

1.1

课程概述

1.2

机器人驱动与运动控制概述

1.3

机器人运动控制系统设计的一般流程

1.1 课程概述

课程教材:

● 指定教材

- 王巍, 蔡月日, 史震云, 张天雪, 机器人控制技术基础, 华中科技大学出版社, 2023年7月第1版.

● 参考教材

- 陈万米, 机器人控制技术, 机械工业出版社, 2020.
- 李宏胜, 机器人控制技术, 机械工业出版社, 2020.
- 郭军龙等, 机器人驱动与控制技术, 哈尔滨工业大学出版社, 2023.
- 贾永兴, 机器人控制技术与实践, 机械工业出版社, 2022.
- 孙巍伟, 机器人伺服控制系统及应用技术, 化学工业出版社, 2023.

1.1 课程概述

课程主要内容:

- 机器人驱动与运动控制概述(2学时)
- 机器人轨迹生成与运动控制(6学时)
- 机器人常用电机及驱动器(8学时)
- 经典分散控制方法(8学时)

1.1 课程概述

学习目标:

- 机器人驱动与运动控制概述
 - 了解机器人驱动与运动控制技术的发展历程
 - 了解机器人运动控制系统总体架构和设计思路
 - 了解机器人控制软件架构和部署原则
 - 了解典型的控制系统硬件架构和选择原则
- 机器人轨迹生成与运动控制
 - 了解机器人轨迹和指令生成方法
 - 了解机器人运动控制系统的硬件组成和运行原理
 - 了解轨迹生成和关节控制指令更新的流程
 - 了解机器人控制问题分类和各种伺服控制方案的基本框架

1.1 课程概述

学习目标:

- 机器人常用电机及驱动器
 - 了解各种电机的适用场合
 - 掌握步进电机和伺服电机及其驱动器的原理和思路
 - 了解步进电机驱动的机器人关节位置控制方法
- 经典分散运动控制方法
 - 了解速度模式和力矩模式机器人关节电机的开环控制模型
 - 掌握具有速度和加速度前馈的独立关节位置PID控制器设计方法
 - 掌握集中前馈补偿位置PID控制器设计方法
 - 了解增量式数字PID控制器的实现原理

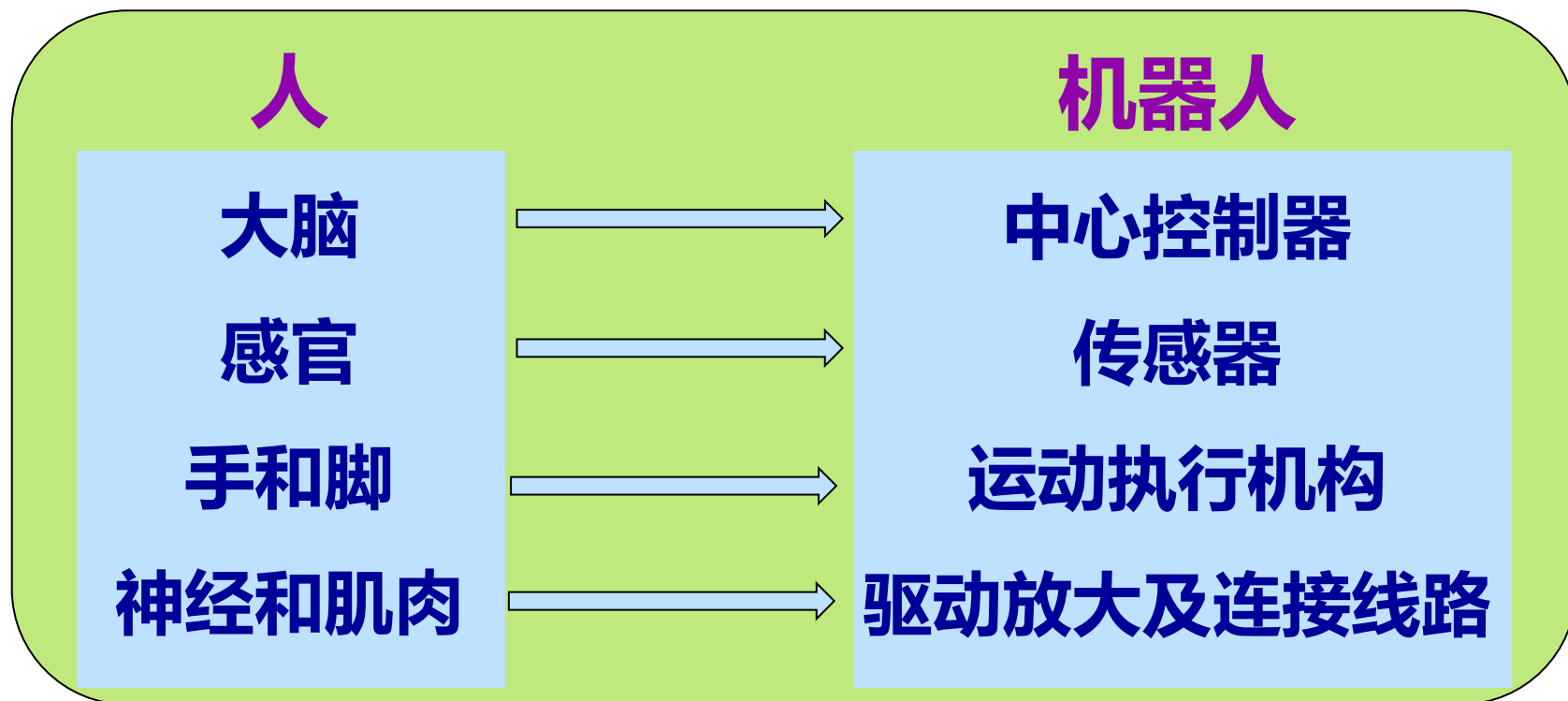
1.1 课程概述

考核方法:

- 闭卷考试(60%)
- 平时成绩(40%)
 - 平时表现(5%)
 - 作业(5%)
 - 课堂小论文(5%) (选择一个研究内容, 写一篇小论文)
 - 实验 (实验表现5%+实验动手5%+实验报告15%)

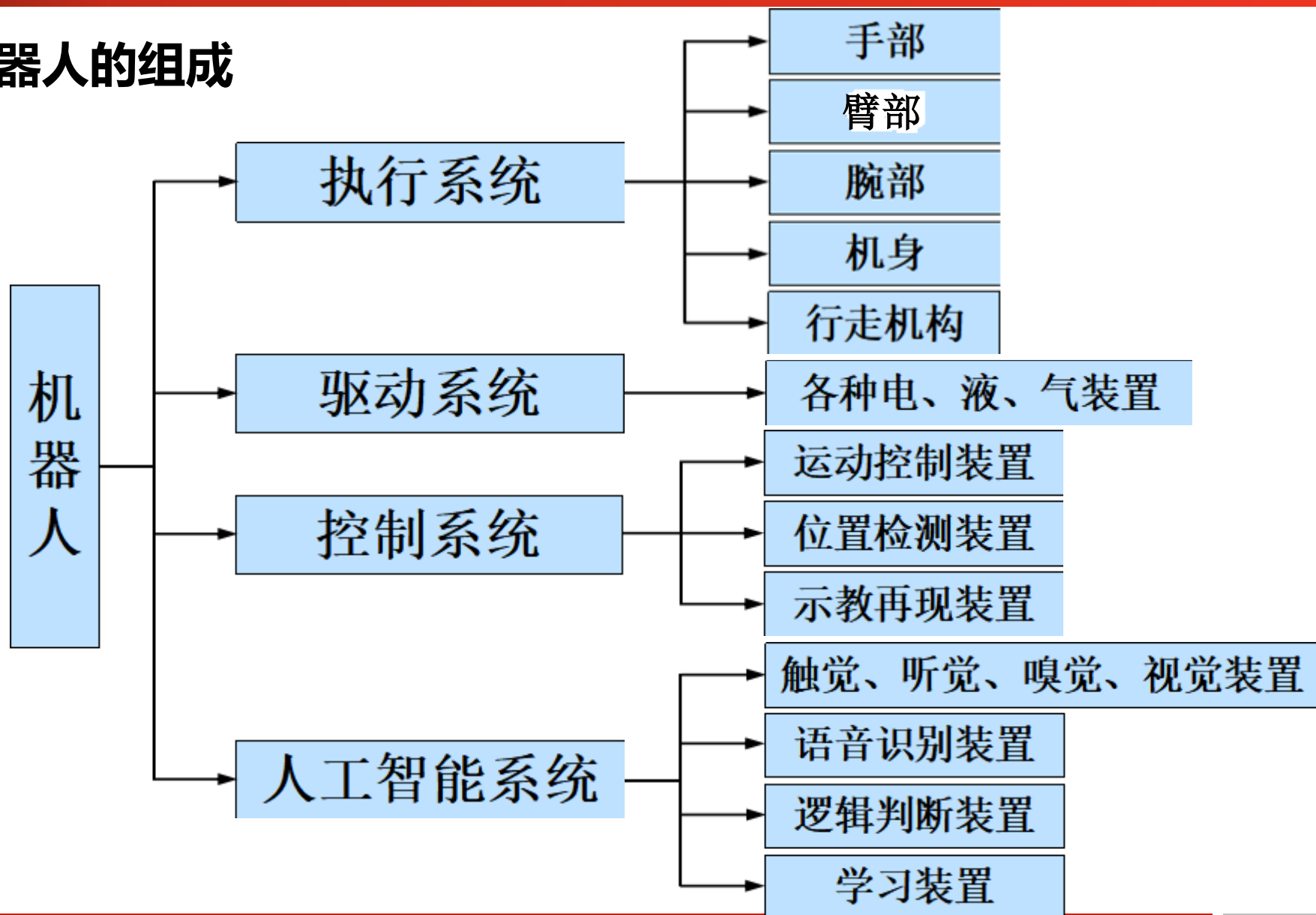
1.2 机器人驱动与运动控制概述

机器人的拟人化比喻



1.2 机器人驱动与运动控制概述

机器人的组成

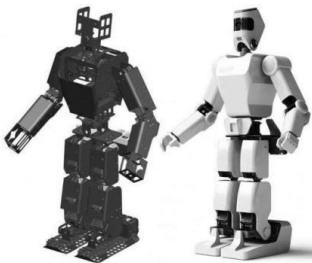


1.2 机器人驱动与运动控制概述

执行机构

机器人的**执行机构**主要是执行驱动装置发出的系统指令。相当于人的肢体，机器人执行机构的任务是根据机器人的指令完成机器人的运动和作业任务，通常由运动机构和执行结构组成。

机器人底盘有**固定式和移动式**两种类型，在移动式的类型中，有轮式、履带式 and 仿人形机器人的步行式等。



运动机构

执行机构

1.2 机器人驱动与运动控制概述

执行机构-传动方式

机器人传动机构的基本要求主要有：

- 结构紧凑，即同比体积最小、重量最轻；
- 传动刚度大，即承受力矩作用时变形要小，以提高整机的固有频率，降低整机的低频振动；
- 回差小，即旋转变向时空行程要小，以得到较高的位置控制精度；
- 寿命长与价格低。

机器人传动方式主要有：

- 齿轮传动；
- 带传动；
- 链传动是通过链条与链轮的啮合，将主动链轮的运动和动力传递到从动链轮的一种传动方式。

1.2 机器人驱动与运动控制概述

执行机构-手部结构

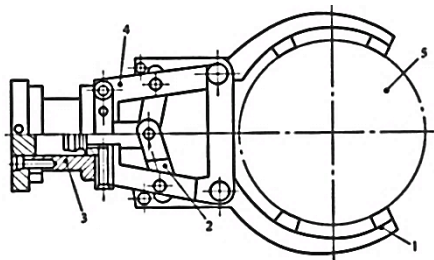
手部是一个独立的部件，手部对整个机器人完成任务的好坏起着关键的作用，它直接关系到夹持工件时的定位精度、夹持力的大小等。

➤ 手部与手腕相连处可拆卸：

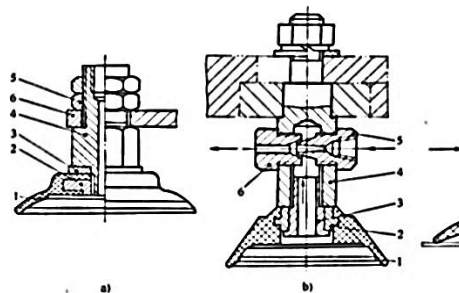
- 手部与手腕处有可拆卸的机械接口：根据夹持对象的不同，手部结构会有差异，通常一个机器人配有多多个手部装置或工具，因此要求手部与手腕处的接头具有通用性和互换性。手部可能还有一些电、气、液的接口：由于手部的驱动方式不同造成。对这些部件的接口一定要求具有互换性。

➤ 手部是末端操作器：可以具有手指，也可以不具有手指；可以有手爪，也可以是专用工具。

➤ 常用的手部按其握持原理可以分为夹持类和吸附类两大类。



1. 夹钳式

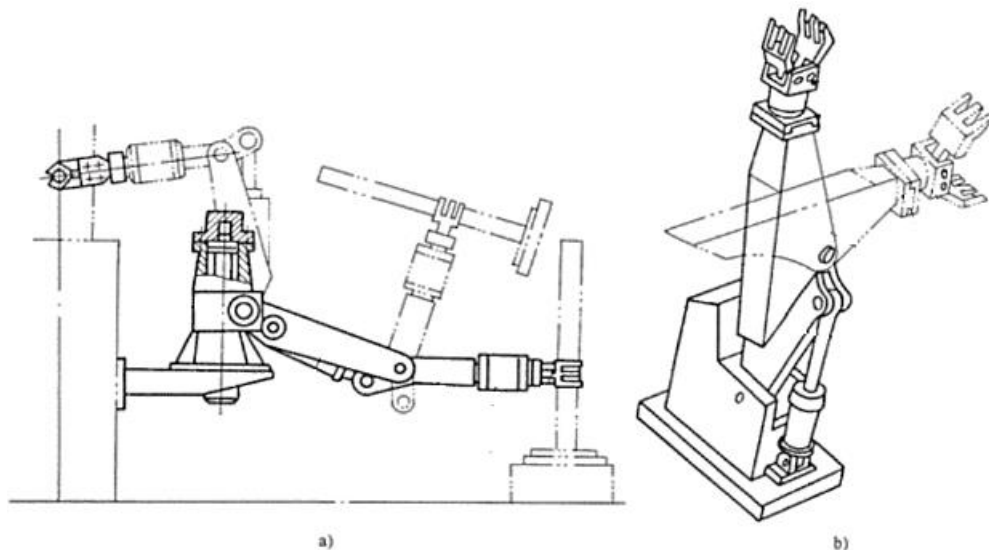


2. 吸附类

1.2 机器人驱动与运动控制概述

执行机构-臂部结构

手臂部件(简称臂部)是机器人的主要执行部件，它的作用是支撑腕部和手部，并带动它们在空间运动。机器人的臂部主要包括臂杆以及与其伸缩、屈伸或自转等运动有关的构件，如传动机构、驱动装置、导向定位装置、支撑联接和位置检测元件等。此外，还有与腕部或手臂的运动和联接支撑等有关的构件、配管配线等。



1.2 机器人驱动与运动控制概述

执行机构-腕部结构

手腕是联接手臂和手部的结构部件，它的主要作用是确定手部的作业方向。因此它具有独立的自由度，以满足机器人手部完成复杂的姿态。要确定手部的作业方向，一般需要三个自由度，这三个回转方向为：

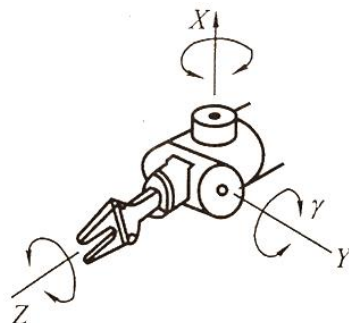
- 单一的翻转功能：手腕的关节轴线与手臂的纵轴线共线，常回转角度不受结构限制，可以回转 360° 以上。该运动用翻转关节（R关节）实现。
- 单一的俯仰功能：手腕关节轴线与手臂及手的轴线相互垂直，转角度受结构限制，通常小于 360° 。该运动用折曲关节（B关节）实现。
- 单一的偏转功能：手腕关节轴线与手臂及手的轴线在另一个方向上相互垂直；转角度受结构限制，通常小于 360° 。该运动用折曲关节（B关节）实现。



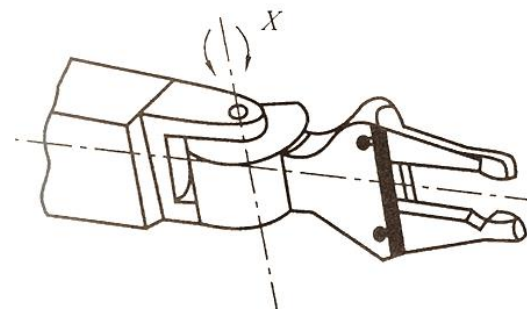
1.2 机器人驱动与运动控制概述

执行机构-腕部结构

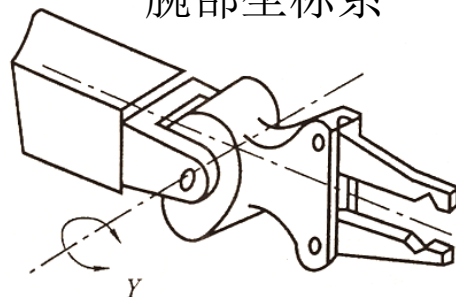
腕部结构的设计要满足传动灵活、结构紧凑轻巧、避免干涉。机器人多数将腕部结构的驱动部分安排在小臂上。首先设法使几个电动机的运动传递到同轴旋转的心轴和多层套筒上去。运动传入腕部后再分别实现各个动作。



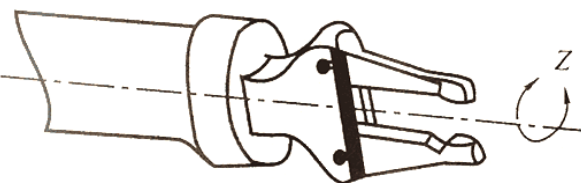
腕部坐标系



手腕的臂转



手腕的腕摆



手腕的回转

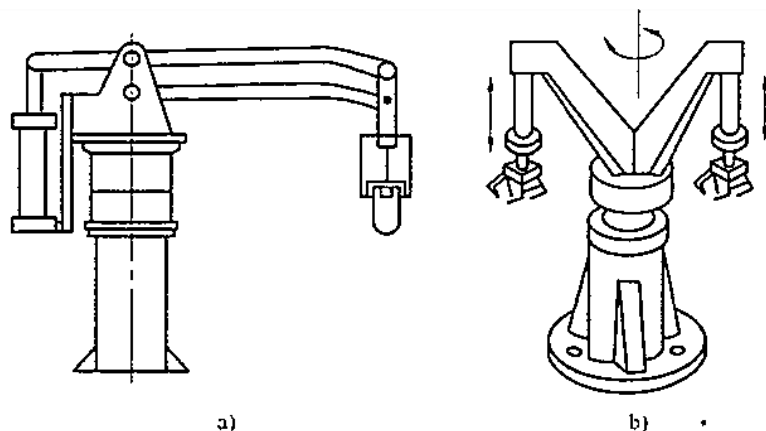
1.2 机器人驱动与运动控制概述

执行机构-机身

- 机身是直接联接、支承和传动手臂及行走机构的部件。它是由臂部运动(升降、平移、回转和俯仰)机构及有关的导向装置、支撑件等组成。由于机器人的运动型式、使用条件、负载能力各不相同，所采用的驱动装置、传动机构、导向装置也不同，致使机身结构有很大差异。
- 一般情况下，**实现臂部的升降、回转或俯仰等运动的驱动装置或传动件都安装在机身上**。臂部的运动愈多，机身的结构和受力愈复杂。机身既可以是固定式的，也可以是行走式的，即在它的下部装有能行走的机构，可沿地面或架空轨道运行。

常用的机身结构：

- 1) 升降回转型机身结构
- 2) 俯仰型机身结构
- 3) 直移型机身结构
- 4) 类人机器人机身结构



1.2 机器人驱动与运动控制概述

驱动装置

驱动装置是驱使执行机构运动的机构，按照控制系统发出的指令信号，借助于动力元件使机器人进行动作。

通常包括驱动源、传动机构等，相当于人的肌肉、筋络。

驱动系统可分为**电气、液压、气压驱动系统**以及它们结合起来应用的综合系统组合。

名 称	特 征 说 明
气动机器人	以压缩空气来驱动执行机构，动作迅速、结构简单、造价低，但工作速度的稳定性差等。
液压传动机器人	以液压方式驱动执行机构，其传动平稳、动作灵敏、出力大，但要求密封性较高。
电动机器人	采用电动方式驱动执行机构，常用的有步进电机驱动、直流电机驱动和交流驱动，其控制方法灵活、结构紧凑简单。

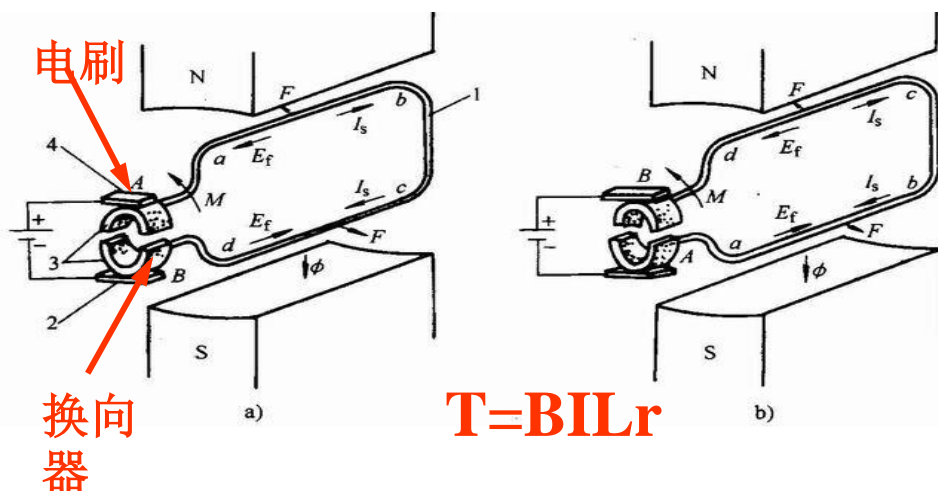
1.2 机器人驱动与运动控制概述

驱动装置-电机驱动

在电动执行装置中，机器人的能源是由电动机提供的，通过电动机的转动达到完成机器人如移动，抓取，搬运等一系列操作。电动机的效率等级表明多少消耗的电量转化成机械能。电动机按原理和用途来分可分为直流电动机、交流电动机和控制电机。

①. 直流电机

左手定则



直流电动机通过换向器将直流转换成电枢绕组中的交流，从而使电枢产生一个恒定方向的电磁转矩。

直流电机是通过改变电压或电流控制转速和转矩。

PWM (Pulse Width Modulation) 控制是利用脉宽调制器对大功率晶体管开关放大器的开关时间进行控制，将直流电压转换成某一频率的矩形波电压，加到直流电机的电枢两端，通过对矩形波脉冲宽度的控制，改变电枢两端的平均电压达到调节电机转速的目的。

1.2 机器人驱动与运动控制概述

驱动装置-电机驱动

②. 交流电机

同步电机：定子是永磁体，所谓同步是指转子速度与定子磁场速度相同。

异步电机：转子和定子上都有绕组，所谓异步是指转子磁场和定子间存在速度差（不是角度差）。

特点：无电刷和换向器，无产生火花危险；比直流电机的驱动电路复杂、价格高。

同步电机的特点：体积小。

用途：要求响应速度快的中等速度以下的工业机器人；机床领域。

异步电机的特点：转子惯量很小，响应速度很快。**用途：**中等功率以上的伺服系统。



1.2 机器人驱动与运动控制概述

驱动装置-电机驱动

③. 控制电机

伺服电动机： 伺服电机又称执行电机，在自动控制系统中，用作执行元件，把收到的电信号转换成电机轴上的角位移或角速度输出。

步进电机： 是一种将电脉冲转化为角位移的执行机构。简单说：当步进驱动器接收到一个脉冲信号，它就驱动步进电机按设定的方向转动一个固定的角度（及步进角）。

自整角电动机： 在无机械联接的转角信号传递系统或电信号的传递系统中，传递角度或信号的电感式角度传感元件。是最早应用的一种微特电机。自整角机与绕线式感应电机相似。

力矩电动机： 是一种把伺服电动机和驱动电动机结合而发展成的电动机，是一种将输入电信号转变为转轴上的转矩来执行控制任务的电机，具有低转速，大转矩的工作特性。

舵机： 集成了直流电机、减速器、检测元件和控制板,并且封装在一个便于安装的外壳里的伺服单元，能够利用简单的输入信号比较精确的转动给定角度的电机系统。



1.2 机器人驱动与运动控制概述

驱动装置-液压驱动

液压系统利用液压泵将原动机的机械能转换为液体的压力能，通过液体压力能的变化来传递能量，经过各种控制阀和管路的传递，借助于液压执行元件(液压缸或马达)把液体压力能转换为机械能，从而驱动工作机构，实现直线往复运动和回转运动。适用于生产线固定式大功率机器人；对于单独的机器人机构。



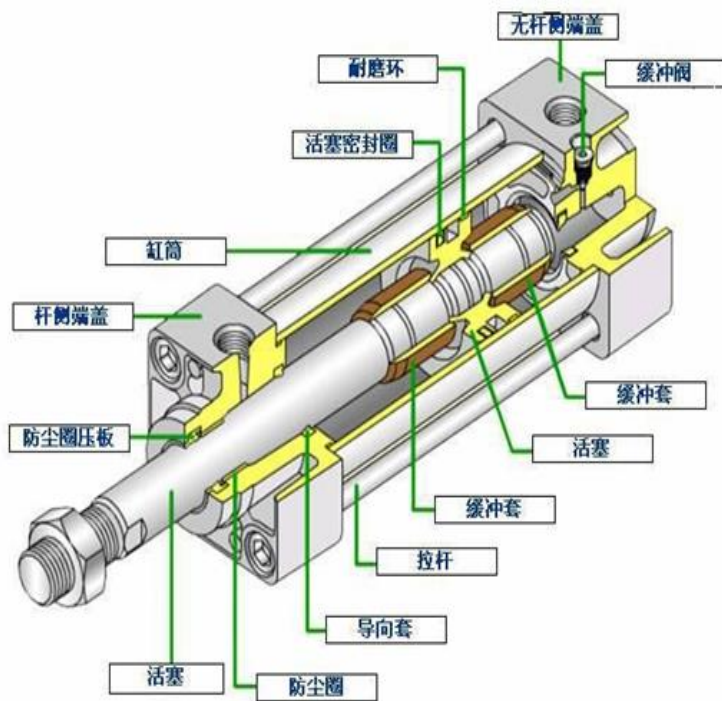
优点是功率大，结构紧凑，刚度好，响应快，容易获得大的扭矩和功率，能够实现高速高精度的位置控制，通过流量控制可实现无级变速。

缺点是必须对油的温度和污染进行控制，有安全隐患，稳定性较差，液压油源等附属设备占空间大。

1.2 机器人驱动与运动控制概述

驱动装置-气体驱动

气压驱动由气源、气动执行元件、气动控制阀和气动辅件组成。气源一般由压缩机提供。气动执行元件把压缩气体的压力能转换为机械能，用来驱动工作部件，气动控制阀用来调节气流的方向、压力和流量，相应地分为方向控制阀、压力控制阀和流量控制阀。



优点是结构简单，价格低，清洁，动作灵敏，具有缓冲作用。

缺点是需要增设气压源，且与液压驱动装置相比，功率较小，刚度差，噪音大，速度不易控制。

1.2 机器人驱动与运动控制概述

控制系统

控制系统相当于人的大脑，通常包括处理器及相应的软件代码组成，用于进行任务及信息处理，并给出控制信号，控制机器人的执行机构，使其完成规定的运动和功能。

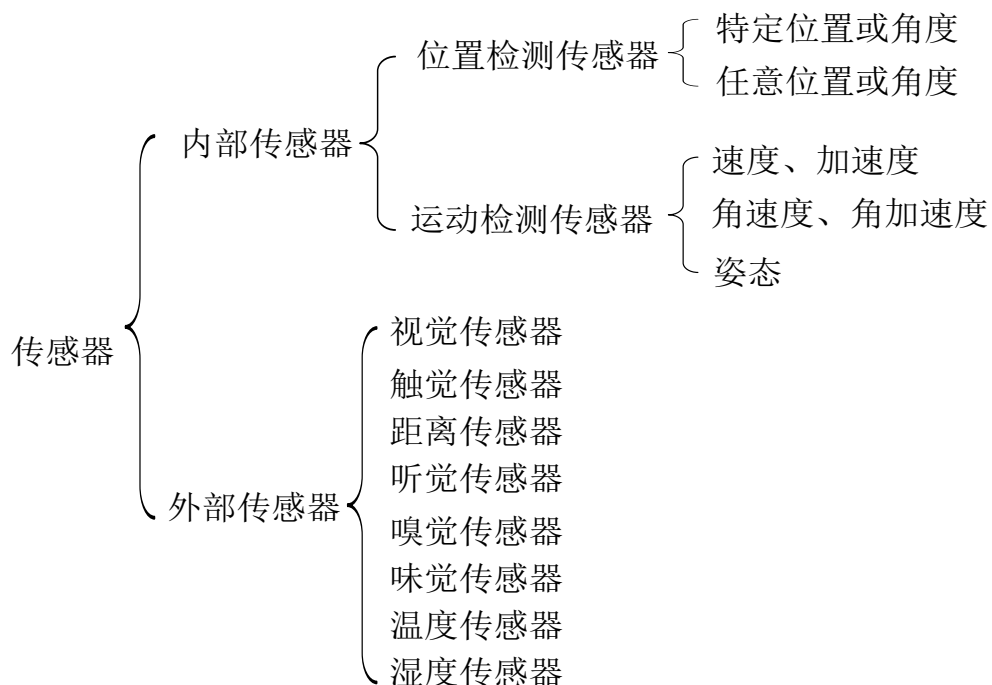
1.2 机器人驱动与运动控制概述

感知系统

感知系统由内部传感器和外部传感器组成，相当于人的感官。

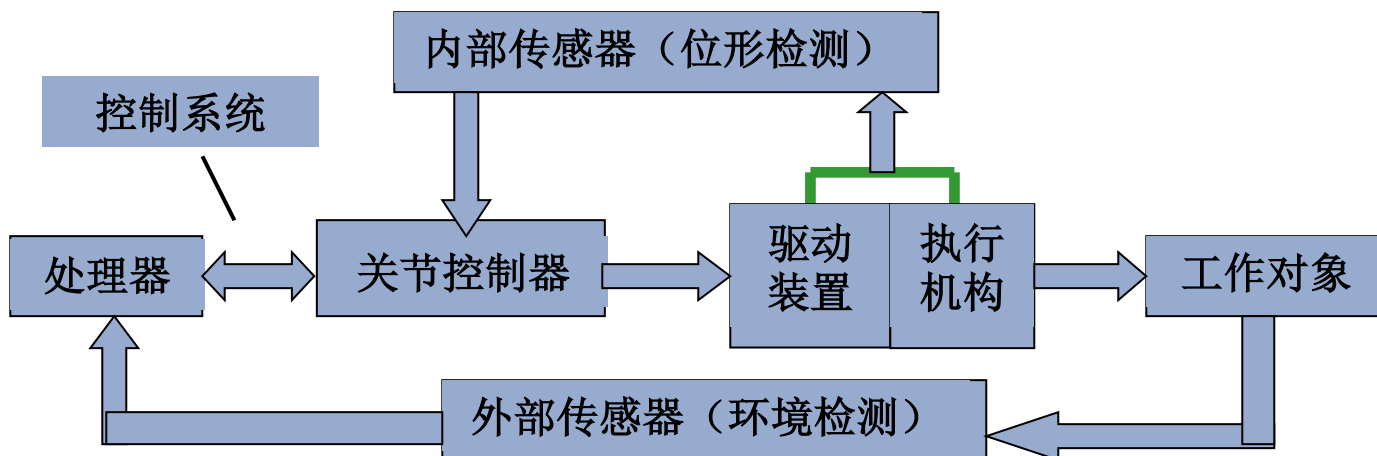
内部传感器用于检测各关节的位置、速度等变量，为闭环伺服控制系统提供反馈信息。

外部传感器用于检测机器人与周围环境之间的一些状态变量。



1.2 机器人驱动与运动控制概述

各部分之间的关系



信息感知、执行机构和运动控制是机器人的三大关键技术。

1.2 机器人驱动与运动控制概述

机器人的主要技术参数

1. 自由度

工业机器人的**自由度**是指机器人操作臂所具有独立坐标轴运动的数目,不包括手爪开合自由度以及手指关节自由度,一般以轴的直线移动、摆动或旋转动作的数目来表示。**通常机器人的自由度数等于关节数目。**

2. 工作空间

是指操作臂末端所能达到的所有点的集合。机器人所具有的自由度数目及其组合不同,其工作范围的形状和大小也不同,自由度的变化量(即直线运动的距离和回转角度的大小)则决定着运动图形的大小。

3. 工作速度

工作速度指机器人在工作载荷条件下及匀速运动过程中,机械接口中心或工具中心点在单位时间内所移动的距离或转动的角度。

1.2 机器人驱动与运动控制概述

机器人的主要技术参数

4. 承载能力

又叫工作载荷，指操作臂机械接口处在工作范围内的任何位姿上所能承受的最大负载，一般用质量、力矩、惯性矩表示。

5. 分辨率

分辨率是指机器人每根轴能够实现的最小移动距离或最小转动角度。分为编程分辨率与控制分辨率,统称为系统分辨率。

6. 驱动方式

驱动装置是机器人的动力之源，目前机器人常用的三种驱动器分别为液压式、气动式和电气式。

其选择原则主要有：

(1) 驱动装置的选择应以作业要求、生产环境为先决条件，以价格高低、技术水平为评价标准；

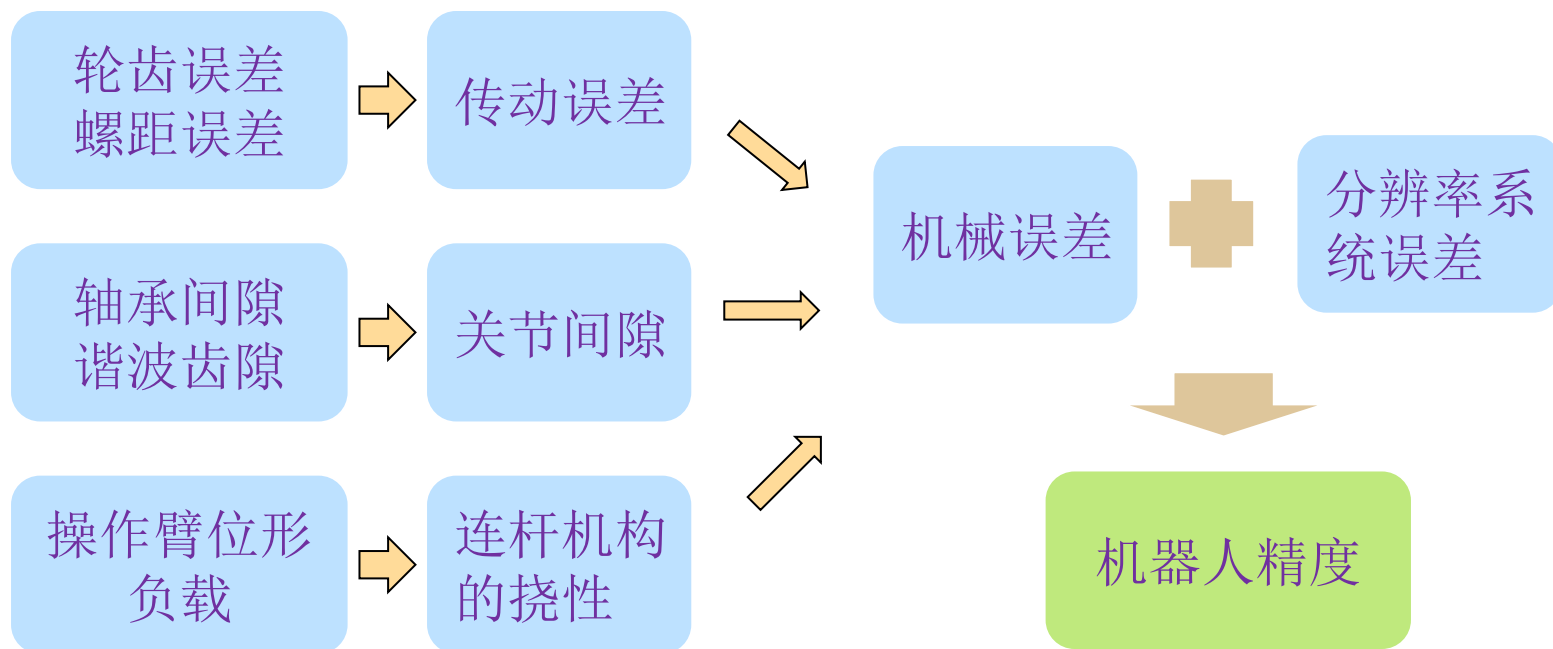
(2) 驱动装置要求关键指标：力矩大、调速范围宽、惯量小和尺寸小。

1.2 机器人驱动与运动控制概述

机器人的主要技术参数

7. 定位精度

定位精度是指机器人手部实际到达位置与目标位置之间的差异。



1.2 机器人驱动与运动控制概述

机器人的主要技术参数

8. 重复定位精度

指机器人在相同的运动位置命令下,连续若干次重复定位其手部于同一目标位置的能力,可以用标准偏差这个统计量来表示,它是衡量一系列误差值的密集度(即重复度)。

PUMA560机器人技术参数



Specifications

Brand	PUMA
Model	560
Type	Robot Arm
Axes	6
Payload	2.5 kg
Reach	864 mm
Repeatability	0.1 mm
Weight	54 kg

1.2 机器人驱动与运动控制概述

1.2.1 机器人控制系统发展历史

基于伺服的机器人控制系统

以运动控制为研究对象的**伺服控制(servo control)**,为解决机器自动运行的稳定性、精确性、快速性等问题提供理论指导和解决方案。



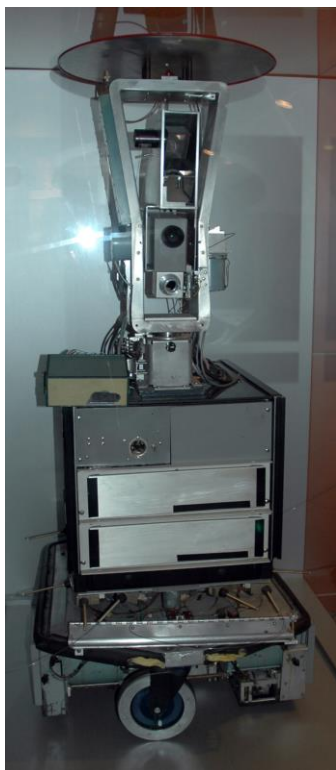
1956年,世界上第一台工业机器人Unimate诞生,作为第一台可编程机械臂,Unimate是今天广泛应用的工业机械臂的原型,控制系统的核心是可编程控制器,其运动完全通过位置控制实现,位置的最小精度为1/16in,移动速率取决于控制率的参数设置液压系统**采用模拟伺服控制器**,而不是现在常用的数字伺服控制器,无法与外部通信。

1.2 机器人驱动与运动控制概述

1.2.1 机器人控制系统发展历史

基于感知的机器人控制系统

第二代机器人装备了更多的传感器，能感知环境的变化及动作的结果，具有强大的外部信息反馈能力，使其控制系统能利用控制算法进行规划决策。



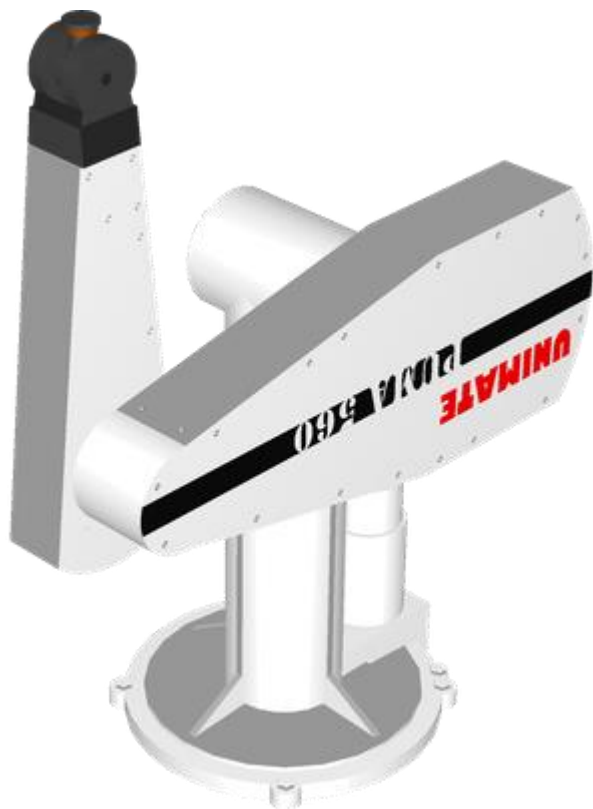
1968年，斯坦福国际研究所研制的智能移动机器人 Shakey，是世界上第一台尝试使用智能算法的机器人。它可以自主进行环境感知、地图构建和运动规划，配备有相机、三角测距仪、接触传感器。

虽然它在当时仅解决了最简单的感知规划和控制问题，但是证实了人工智能领域的一些重要科学结论，并促成了两种经典导航算法-**A*算法和可视图算法**。

1.2 机器人驱动与运动控制概述

1.2.1 机器人控制系统发展历史

基于感知的机器人控制系统



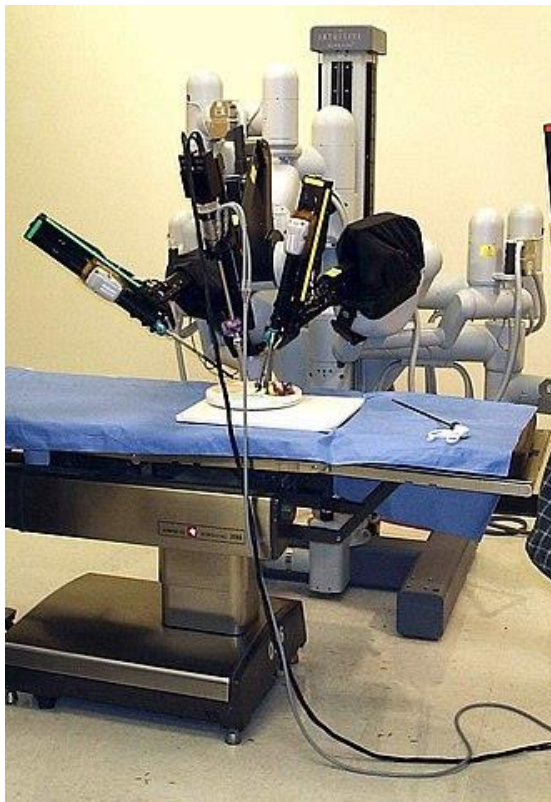
1978 年，Unimation 公司发布了 PUMA560 机器人，这款六轴机械臂由电缆连接关节伺服电机、制动器、位置传感器和控制单元，借助 Unimation 公司对机器人控制而设计的计算机编程语言 VAL，可以对机器人进行实时位置控制，也支持操作员利用手动控制盒，对机器人进行手动控制。

1.2 机器人驱动与运动控制概述

1.2.1 机器人控制系统发展历史

基于智能的机器人控制系统

智能机器人装有丰富的传感器，运用最新的控制理论和人工智能技术，能够感知环境、建立和修正环境模型，做出决策及制定规划，并具有一定的学习功能。



2000年，美国Intuitive Surgical公司开发的达芬奇外科手术机器人，是一种具有复杂自由度和成像装置的多臂手系统，它可以较好地过滤人手的颤振，通过人的远程操控完成多项复杂操作。

手术机器人的核心是直流电机。这些电机的工作原理是将为机器人提供动力的电能转换为允许机器人移动的机械能。来自控制台外科医生的输入通过控制台电子设备进行转换，然后控制台电子设备向机械手中的电机提供输出信号。**用于外科手术应用的直流电机必须在低速时具有全转矩。**这在手术机器人中很重要，因为机械手需要全方位的运动，以最大限度地提高其敏捷性和有效操作。紧凑的电机使机器人更轻，这反过来又使其更加灵活和精确。

1.2 机器人驱动与运动控制概述

1.2.1 机器人控制系统发展历史

基于智能的机器人控制系统



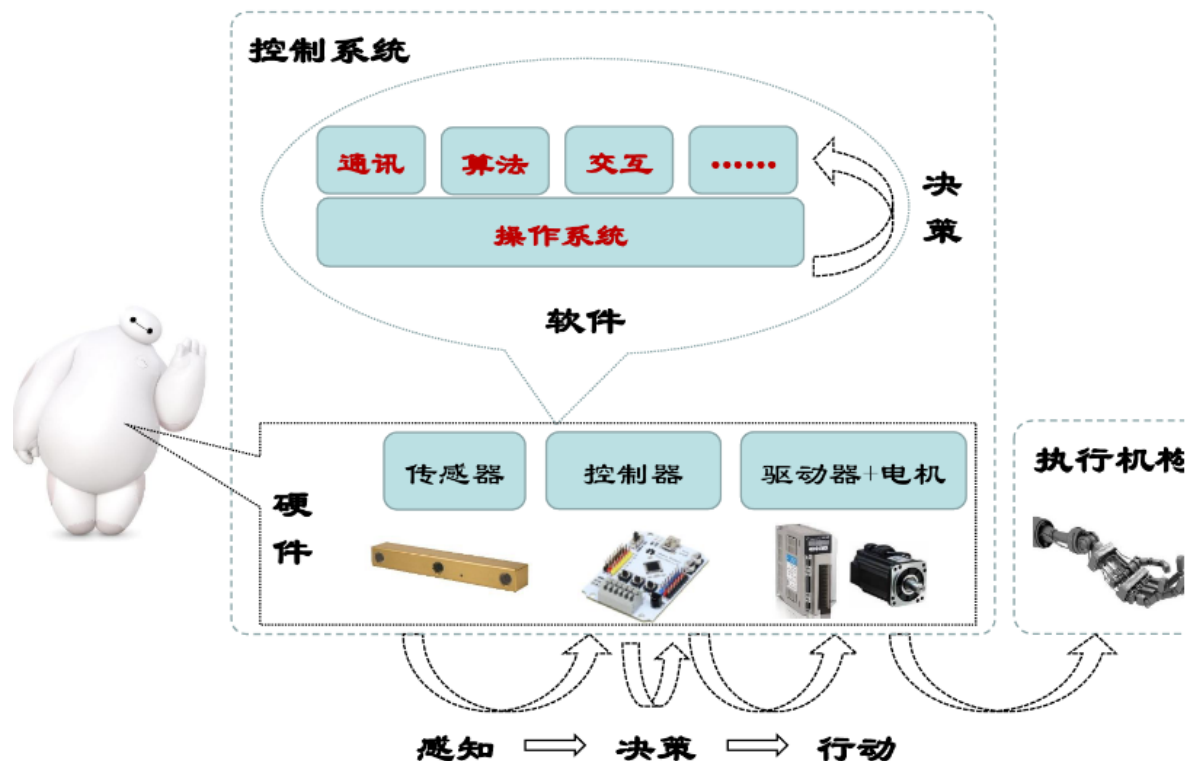
2005年，美国波士顿动力公司推出了一款动态稳定性极强的四足机器人“Big Dog”。该机器人可以负载45kg，预设了一系列规划步态，通过关节和足底的传感器检测自身状态，借助陀螺仪和惯性传感器获得位姿信息，实现动态平衡，利用激光雷达和立体视觉感知环境信息，采用SLAM技术进行环境建模和路径规划。

BigDog 由二冲程(two-stroke)、单缸(one-cylinder)、15 匹制动马力 (11 kW) 卡丁车发动机提供动力，转速超过 9,000 RPM，**发动机驱动液压泵，液压泵又驱动液压腿执行器**。每条腿有四个执行器（两个用于髋关节，一个用于膝关节和踝关节），总共 16 个。每个执行器单元由液压缸、伺服阀、位置传感器和力传感器组成。

板载计算能力是坚固耐用的 PC/104 板卡堆栈，带有运行 QNX 的奔腾 4 类计算机。

1.2 机器人驱动与运动控制概述

1.2.2 机器人控制系统概述

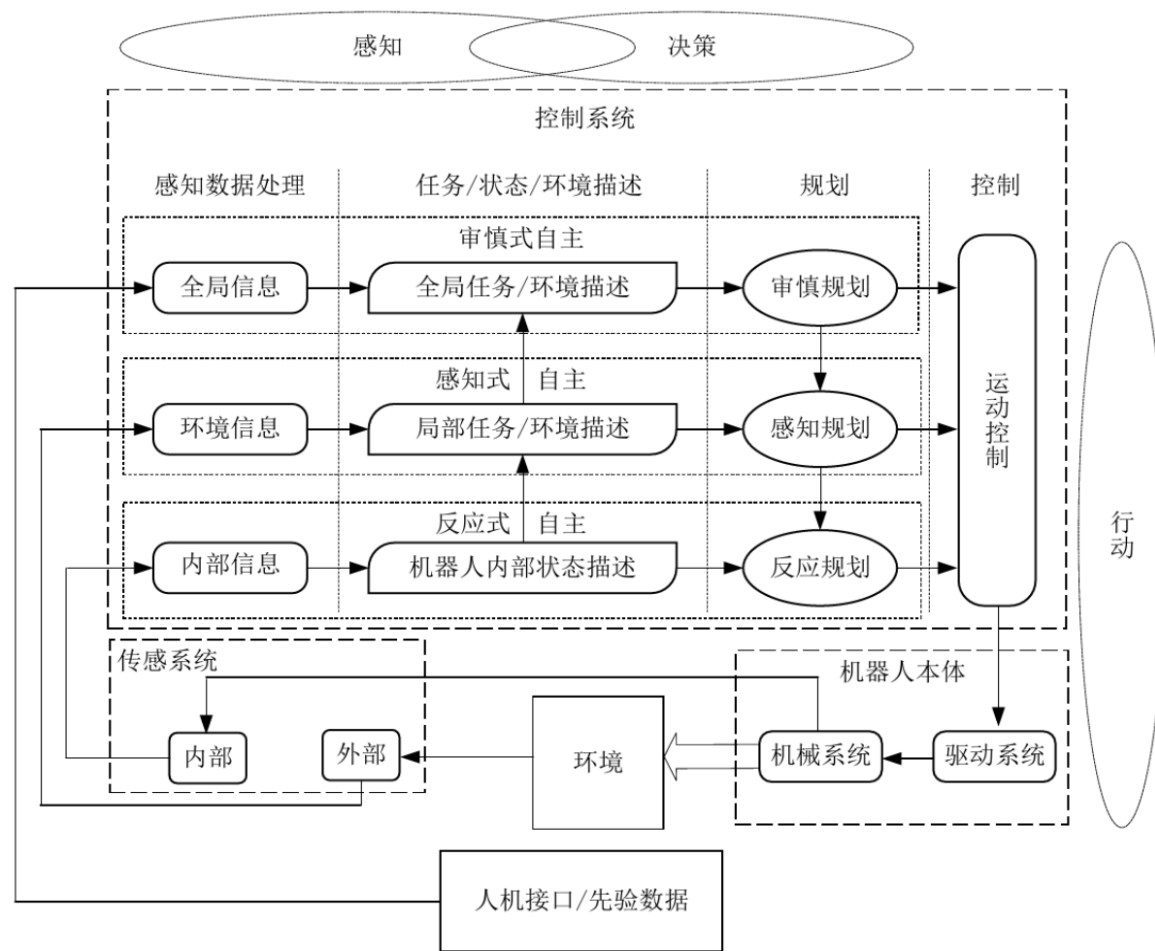


机器人控制系统组成

机器人是一类具备环境感知、自主任务规划和执行能力的智能机电装置，它遵循感知→决策→行动→感知的循环，不断与环境(人)交互，完成自主规划，控制本体执行既定任务。

1.2 机器人驱动与运动控制概述

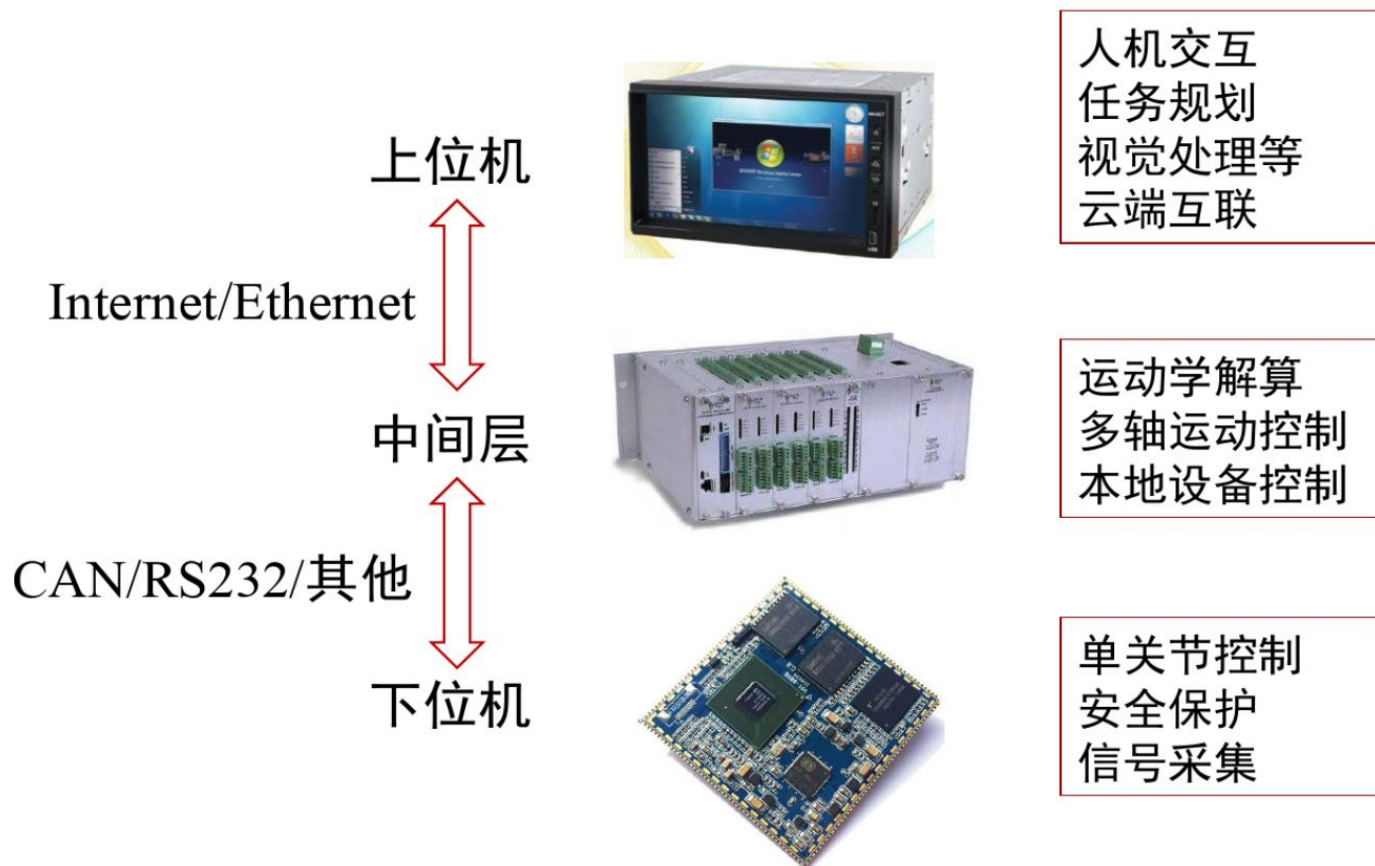
1.2.2 机器人控制系统概述



机器人控制系统的软件架构

1.2 机器人驱动与运动控制概述

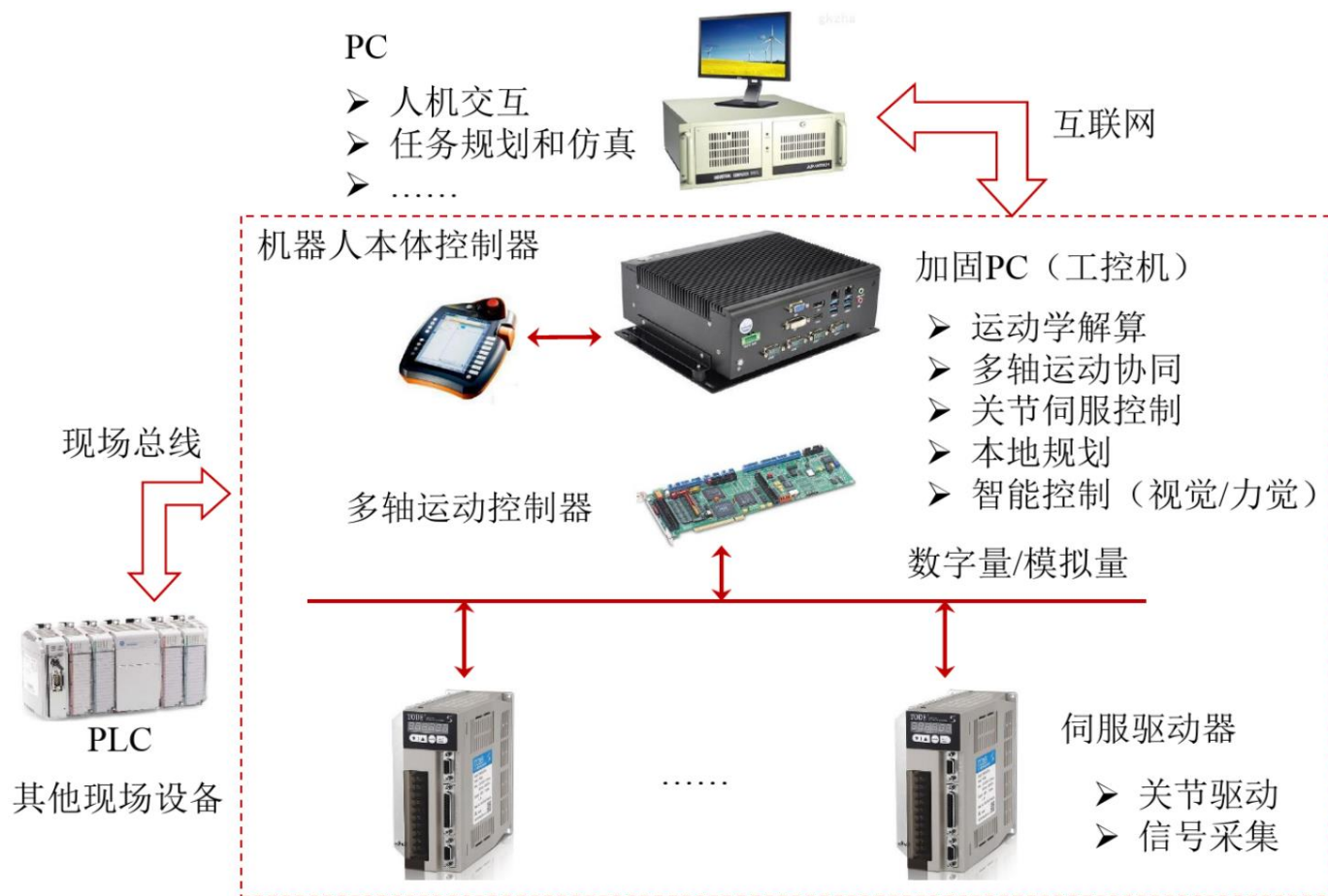
1.2.2 机器人控制系统概述



工业机器人控制系统的典型硬件架构

1.2 机器人驱动与运动控制概述

1.2.2 机器人控制系统概述



工业机器人控制系统的典型硬件架构

1.2 机器人驱动与运动控制概述

1.2.2 机器人控制系统概述

工业机器人控制系统的典型硬件架构

- 为实现高速、高精度运动控制，多数工业机器人的控制系统配备了独立的**运动控制器(motion controller)**；
- 作为工业机器人控制器的核心组件，运动控制器接受PC下发的运动指令，实现运动学解算、轨迹生成和各关节轴的伺服控制，因此，也被称为**多轴运动控制器**；
- 现代运动控制器多以DSP为核心，通过扩展总线、网络等方式与PC通信；
- 运动控制器向伺服驱动器发送控制信号，驱动关节电机运动。

1.2 机器人驱动与运动控制概述

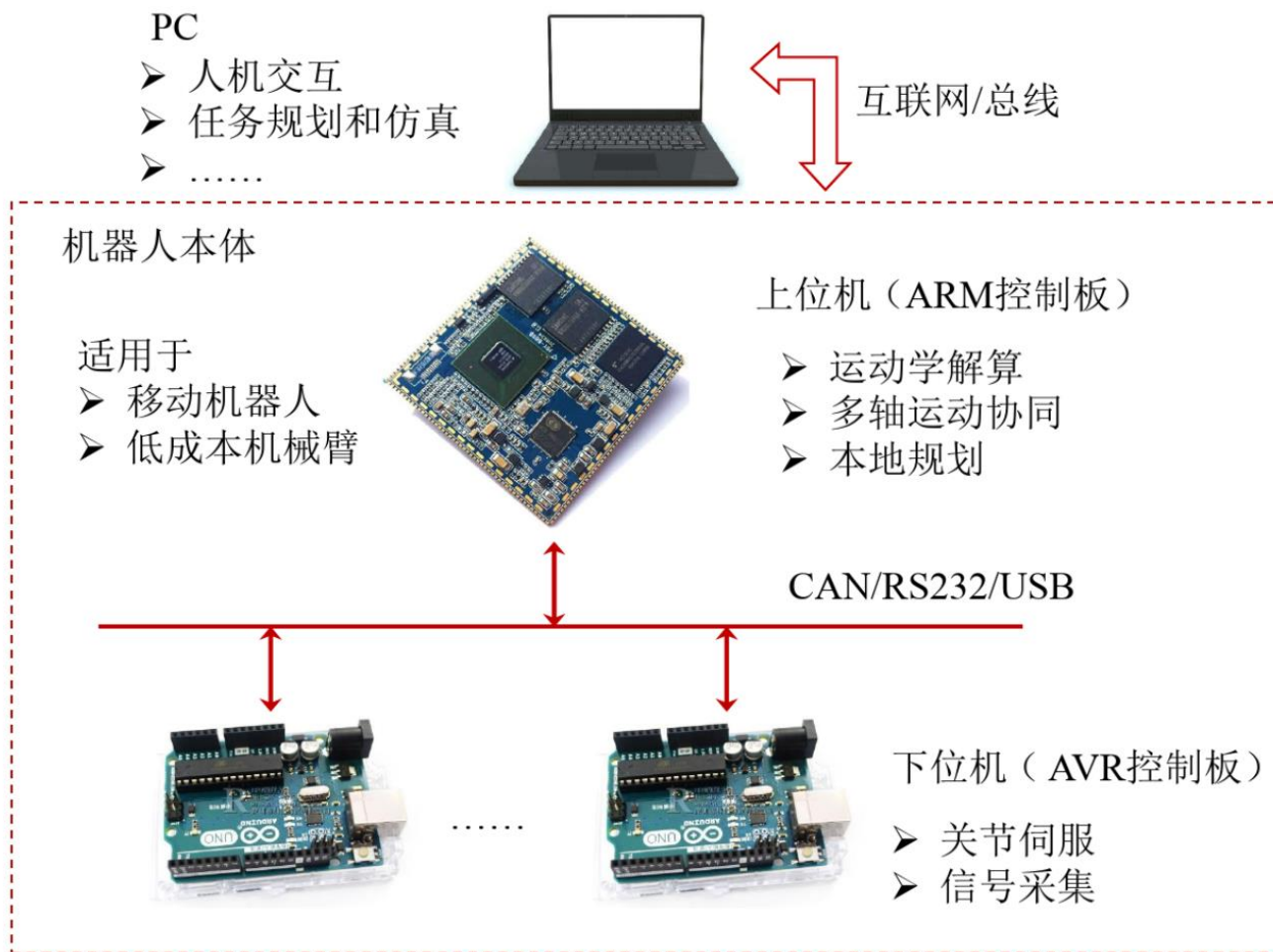
1.2.2 机器人控制系统概述



机器人控制器-基于现场总线的分布式运动控制系统

1.2 机器人驱动与运动控制概述

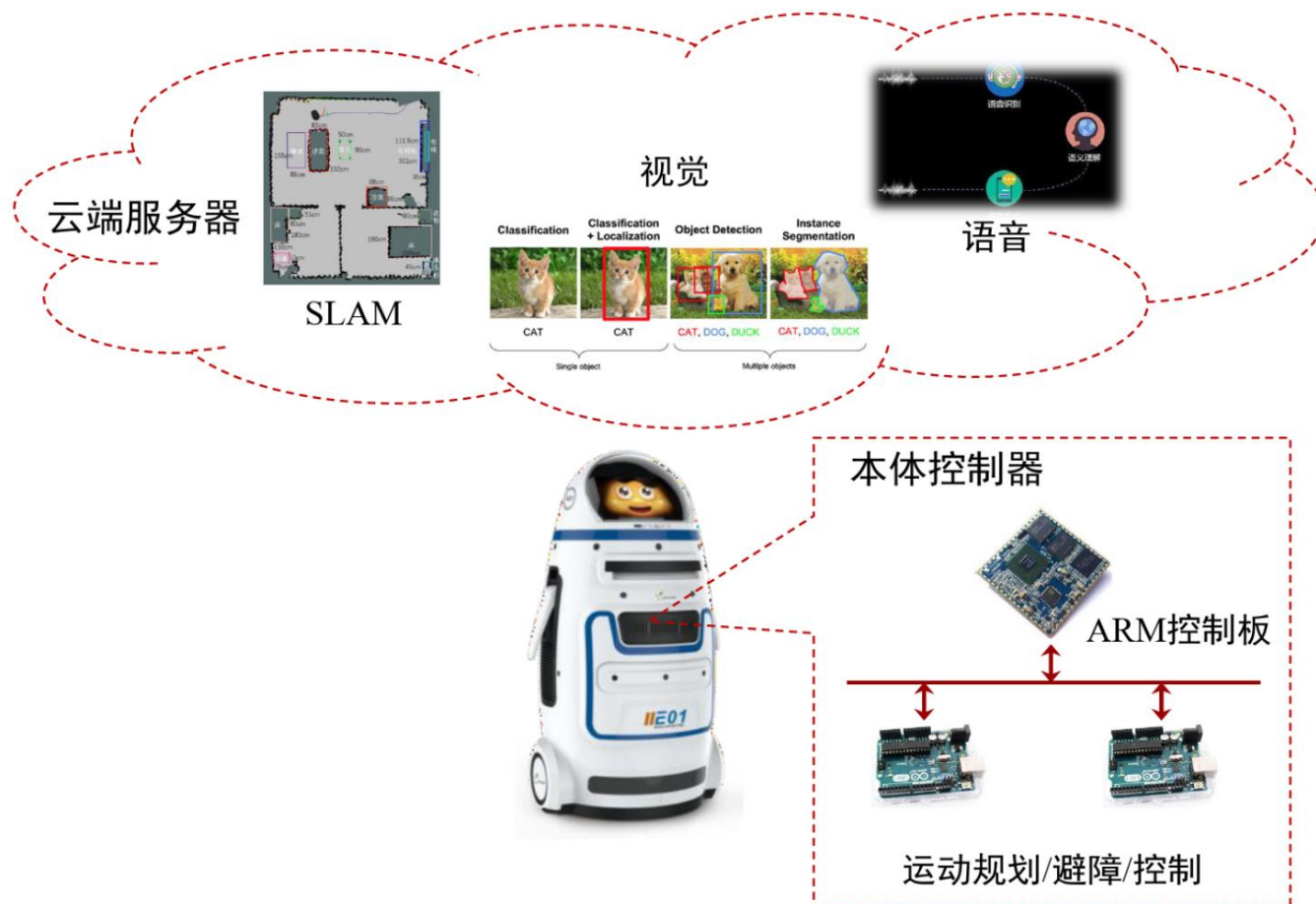
1.2.2 机器人控制系统概述



机器人控制器-小型移动机器人的典型硬件构架

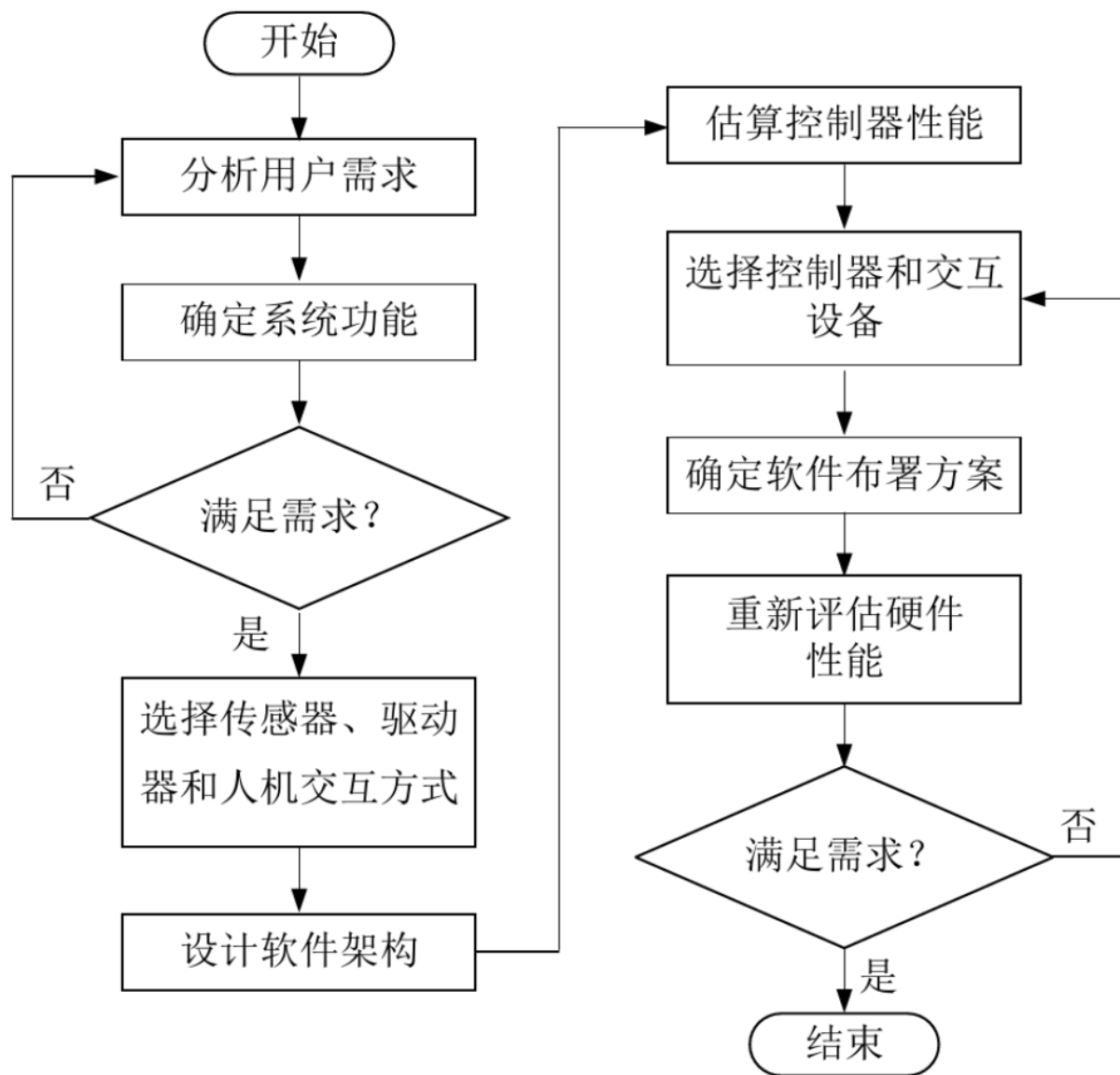
1.2 机器人驱动与运动控制概述

1.2.2 机器人控制系统概述



机器人控制器-云端分布式计算架构

1.3 机器人控制系统设计的一般流程



1.3 机器人控制系统设计的一般流程

机器人控制系统架构选择的基本原则

● 硬件方案

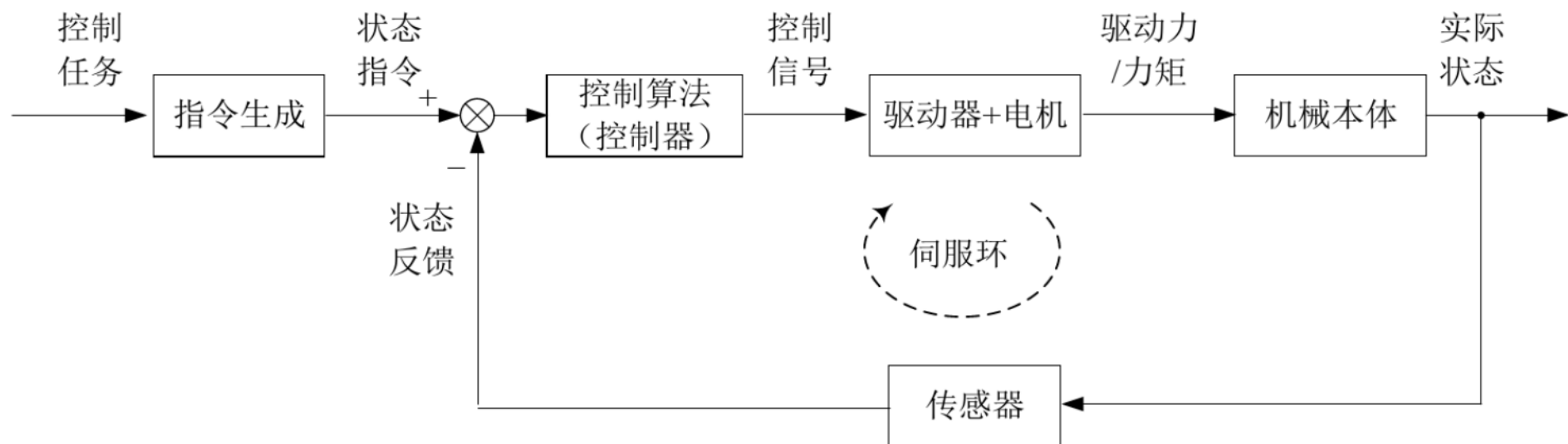
- 算法复杂度
- 安全性、可靠性
- 成本
- 实时性
- 通讯频率
-

● 软件部署

- 本机部署 ——高实时性或低算力
 - ✓ 运动伺服、安全避障等
 - ✓ 触碰检测、电池监测、I/O控制等
- 本地服务器/上位机 ——高实时性和高算力
 - ✓ 人机交互 ——指令解析和信息反馈
 - ✓ 工业场景的多机联动 ——任务决策和分配
 - ✓ 低成本机器人的辅助环境监测 ——全场景视觉监测
- 云端服务器 ——非实时复杂算法
 - ✓ 视觉、SLAM、语音

课程研究内容

工业机器人运动/力控制技术



机器人实现运动和力控制的一般原理

自己查阅文献，写一篇小论文，重点阐述：

- 控制系统实现方法
- 电机及驱动器原理
- 运动和力控制算法原理

1.2 机器人驱动与运动控制概述

工业机器人运动/力控制技术

- 为保证高精度输出，控制系统必须对运动和力实施闭环控制，构成**伺服环** (servo loop);
- 伺服环的输入是状态指令，它是机器人末端或关节的位置、速度、力/力矩的**时间函数**;
- 控制算法把状态指令与系统实际输出状态进行比较，产生控制信号，**发送给驱动器和电机**，进而由电机输出关节力/力矩，驱动机器人机械本体运动或对环境施加作用力;
- 由于控制算法是决定机器人控制性能的重要因素，因此，在自动控制领域，也把控制算法称为**伺服控制器**(servo controller)，或者直接简称为**控制器**;
- 驱动单元是控制系统的直接控制对象，在机器人中，由电机及其驱动器组成的电气驱动器单元最为常用。**控制系统硬件需要与驱动器匹配，控制算法也需要驱动器和电机的准确模型。**

课程作业和研究内容

作业

- 1、工业机器人控制系统中，伺服环的定义是什么？
- 2、查阅资料，简述世界上第一台实用化工业机器人PUMA的运动控制和传感系统组成。（也可研究达芬奇机器或大狗机器人）

研究内容

查阅资料，简述世界上第一台实用化工业机器人PUMA的运动控制和传感系统组成。（也可研究达芬奇机器或大狗机器人）