

第一章 绪论

1.1 课题研究背景

机器人自从问世以来，就一直被希望能够代替人类完成危险或者枯燥的工作。事实上，机器人也最适合替代人类完成高强度的工作或者代替人类进入无法工作的危险场地，它们在这些领域可以比人类工作得更好，因此随着机器人技术的发展，机器人的应用领域不断增大。机器人按照机械结构形式可以分为具有固定底座的机器人机械臂和移动式机器人例如轮式或者步行，其中固定底座的工业机器人在汽车制造、电气电子、半导体加工等行业有着广泛应用（见图 1-1），因其固定的运动形式保证了长时间运行的可靠性，所以学者对其有着大量的研究，应用相对成熟。根据国际机器人学联合会(IFR)的最新报告，在 2012 到 2017 年期间，在制造业中机器人的采用率每年增加 18%，其中汽车、电子销售额占全球市场的 60%^[1]。同时，协作机器人作为机器人行业的一个新的领域或者分支，自 2014 年到 2017 年，全球协作机器人销量年均复合增速达到了 69%，预计到 2020 年，全球协作机器人市场规模将突破 84 亿元^[2]。丹麦 Universal Robots 公司推出的 UR 系列的协作机器人如图 1-2 所示，全球销量累计已超过 27000 台^[3]，可见其在实际生产中有着巨大的用途。在不远的将来，像协作机器人这种本身能够识别外界环境，并且能对外界信息进行交互的机器人^[4]必将会在工业生产中得到越来越多的关注。

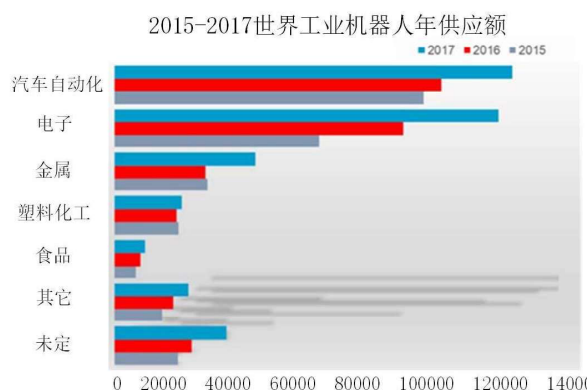


图 1-1 IFR 工业机器人供应用途

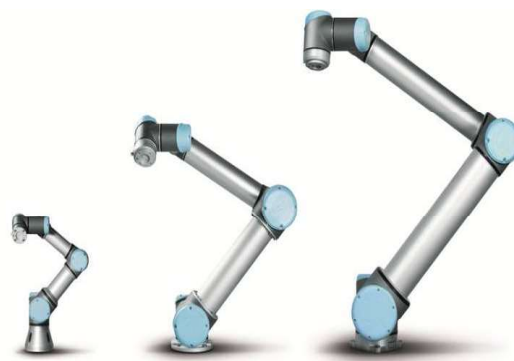


图 1-2 UR 系列协作机器人

按照美国机器人学会(RIA)的分类，机器人可以分为四类：可变顺序机器人、示教在线机器人、数控机器人和智能机器人^[5]，其中智能机器人是指机器人具有感知和理解外界环境的能力。即使其工作环境产生变化，也能够成功的完成既定的任务。依据工业机器人的任务类型可以分为焊接、搬运、喷涂、打磨、装配、检测等，然而对于其中的装配打磨等高端应用场景，国产机器人市场份额较低，国产品牌在搬运及上下料、焊接和装配及拆卸应用中占比 61.4%、14.8%和 10.4%。由于搬运及上下料等领域技术壁垒较低，国产机器人主要集中于该中低端场景，份额较大，高于行业平均占比，如图 1-3 所示；而焊接等领域要求精度较高，国产品牌平均占比低于行业水平，国产增速明显低于行业增速^[6]；对于打磨等场景基本都是国外品牌的机器人，如图 1-4 为 ABB 机器人在打磨车间进行打磨任务。

中国工业机器人市场很大，而且中小型企业自动化改造的需求日益剧增，但是国外品牌的工业机器人依据占据主要的市场，尤其是在机器人与环境有力交互的场合，国内品牌的机器人经验薄弱。所以本文主要着眼于机器人力交互关系，即工业机器人的交互力控制策略，这里的力指的是与环境的相互作用力。无论是协作机器人所具有的人机碰撞检测急停功能，还是打磨零件中要求对零件沿着特定的方向有着恒定接触力，或是孔轴装配中接近孔、寻孔、插入的主动装配策略，都对机器人的力控制策略的效果有很高的要求。虽然力觉如同机器视觉一样都是机器人与环境的交互策略，但

是机器人视觉由于其框架成熟，开源资料丰富普及程度很高，而机器人力觉目前还没有完善统一的框架，体系仍待完善^[7]。

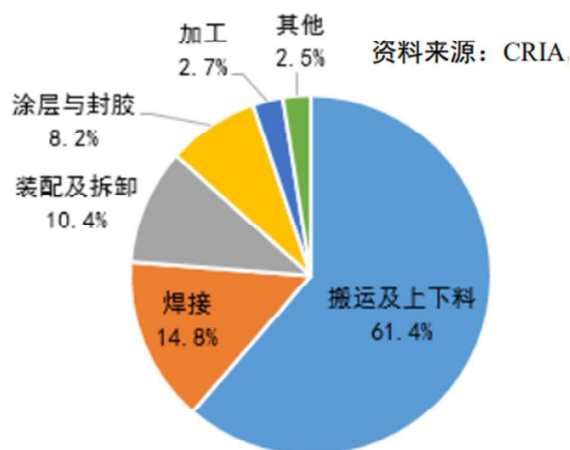


图 1-3 2017 国产品牌各应用领域占比

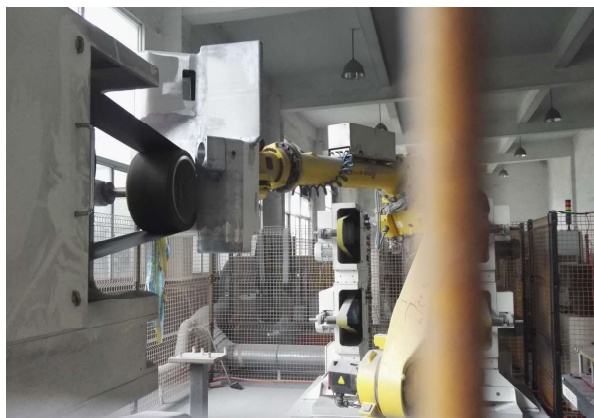


图 1-4 工业机器人在打磨的应用

使用机器人作为力控制平台已有多年的历史，力控制算法已有一些成功的应用案例，但是这些应用大多数是基于现有的位置机器人平台，所以这就导致对力控制研究的局限性，对于机器人系统和力控制之间的关系并没有一个完整的阐述。而本文将会从机器人的动力学出发，推导机器人力控制和机器人的关系，对机器人力控制技术的研究和应用领域的扩展有着重要意义。

1.2 机器人柔顺力控制研究现状

关于国外机器人力控制的研究，最早可以追溯到上个世纪的七十年代中期，但是早期的力控制主要是单纯的包含力误差回路的直接力控制^[8]。这种力控制往往比较单一，其控制思想都是基于对力误差的 PD 控制，并没有一个很好的模型考虑机器人和环境之间的动态交互特性。此外，在实际的应用过程中往往会因为环境较大的刚度，导致在自由空间(机器人末端执行器没有接触到环境刚体)向约束空间(机器人末端执行器接触到环境并且丧失某些自由度的运动)的转化过程中出现反复的震荡^[9]，如图 1-5 所示。图中预过渡阶段，会反复的在两种运动中频繁的切换，因此对于一个好的控制，仅仅考虑机器人末端从未接触到接触再到恒力接触的控制过程是不够的，所以有必要将环境几何特性与机器人的关系考虑到控制策略中。

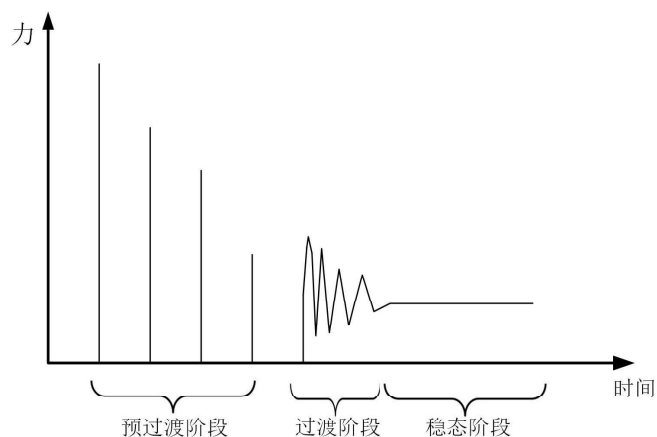


图 1-5 一个典型硬接触的接触力图

由于力传感器一般直接装在机器人的末端，而末端执行器装在力传感器之后。根据 Robert 对环境^[10]的理解，“环境”不仅仅是指机器人接触到的外部物件，而是直接将除了腕力传感器之外的所有元件：包括与机器人连接或者接触的所有机械部分都包含其中。通过这个定义，末端执行器的质量

和柔性都被考虑成环境的一部分。在末端执行器上做出的柔顺特性被称为被动特性，而控制这种被动特性被称为被动柔顺控制。与被动柔顺控制对应的就是主动柔顺控制，主动柔顺控制将会使用反馈对控制目标进行主动的控制。下面将分别介绍两者的研究现状。

1.2.1 被动柔顺研究现状

目前被动柔顺主要是通过某种柔顺机构来实现的。所谓具有被动柔顺性的机构，就是当机器人在与环境相互作用的时候，将一些能够吸收或者储存部分能量的机械器件作为机器人的主要机构组成部件，例如减震器、弹簧等机构。典型的被动柔顺装置是 Whitney 在 1979 提出并研制的 RCC(Remote Compliance Center)，即远程柔顺中心^[11]。这是一个由多个弹性元件构成，可以适应空间 6 个自由度变化柔顺的手腕装置。其后出现的大量关于柔顺装置和 RCC 都是建立在这个基础之上的。由于这个柔顺中心的存在，插孔时工件与孔之间干涉产生的力与力矩会使柔顺中心沿着力的方向平移和旋转，其中平移会使工件寻孔，而旋转会使工件与孔平行^[12]，如图 1-6 所示^[13]。最早 Whitney 使用具有弹性的橡胶件用作制作 RCC 的基本元件，并且 Whitney 还总结出了用 RCC 进行孔轴装配的几种理论分析的过程^[14]，如图 1-6、图 1-7 所示，可以从图中看出把被动柔顺简化成直线弹簧和扭簧的作用，在三个装配过程中可以从理论层面选择避免卡阻的参数条件。

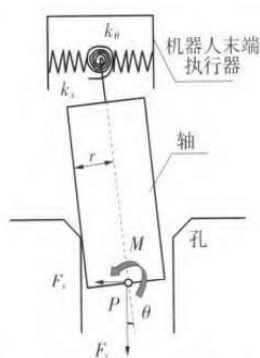


图 1-6 RCC 等效受力模型

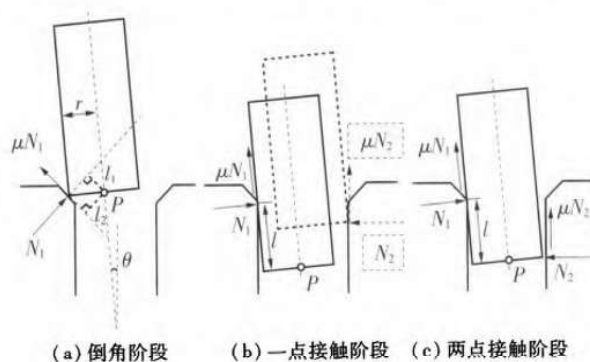


图 1-7 孔轴装配过程简化

除此之外，依据任务的不同，学者研发了不同的 RCC 柔性手腕，例如 ARCC 主动柔顺手腕（用于无倒角孔轴装配）^[15]、VRCC(变结构参数)^[16]、IRCC(带有检测功能)^[17]等。其中南京理工大学机器人研究所研制的变参数柔顺手腕，其机械结构的刚度和电机控制系统的刚度可变，通过调节闭环伺服系统的刚度大小可以调节总体柔顺手腕刚度，最后可以达到调节柔顺中心位置的目的^[18]。天津大学的王刚等人提出了利用性能参数优化和结构参数优化的方法设计层叠型弹性元件柔顺手腕^[19]；天津大学机器人研究中心使用了 ANSYS 分析柔顺手腕等内应力，并得到较好的仿真效果^[20]。设计这些弹性机械柔性体的目的是为了实现平移与旋转之间的最大解耦，在孔轴装配时保证沿着被插入方向有很高的刚度，而沿着其它方向有很高的柔度^[21]，当因规划误差或者因为机器人本身定位误差产生不可避免的偏移力和力矩的时候，这将会对机器人轴的位置进行修正，最终成功完成装配任务。

由于在工业生产中装配是一个非常普遍的环节，很多厂家如美国的 ATI 公司和韩国 Center Master 公司都有相应的针对装配的 RCC 产品，图 1-8 就是 ATI 公司针对孔轴转配的一种 RCC 的工作示意图。但是，针对不同的零件和尺寸，必须按照选型手册重新选一个合适新的作业环境的 RCC，本质上，不同的型号的 RCC 改变了在受力时不同方向的刚度，从而针对不同的零件质量和受力可以调整变化的位移量。

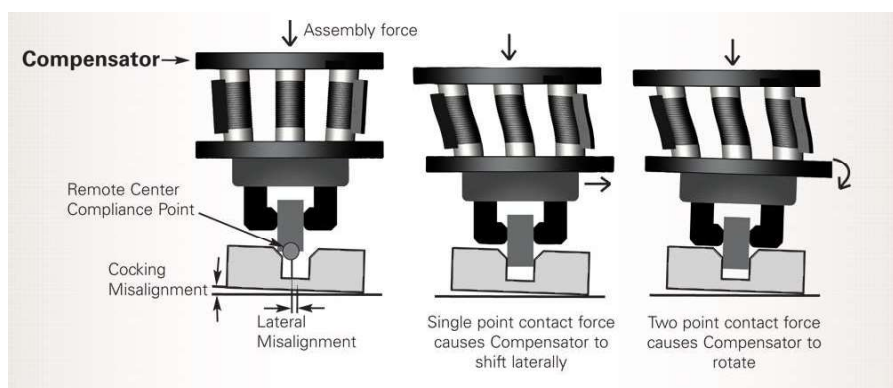


图 1-8 ATI 公司的 RCC 工作示意

1.2.2 主动柔顺研究现状

RCC 装置中的柔顺特性是取决于材料特性或者机械的结构特点，因此一般柔性刚度以及柔性中心点都是要根据不同的工作条件进行选择^[22]。当采用单一 RCC 的时候，不能满足更普遍的交互任务，因此其通用性很低，故有必要直接在控制器中加入柔顺特性，即主动柔顺控制。通过力传感器，获取机器人末端执行器在执行任务过程的受力情况，从而动态调整控制参数，实现主动柔顺控制。

主动柔顺控制由于一直需要检测交互力以改变控制量，所以合适的力传感器是必不可少的。常用的力的检测方案一般有六维力传感器、扭矩传感器、电流检测等。其中电流检测是根据电机的扭矩与电流的关系来估计关节扭矩，但是由于电机的转速与扭矩特性，机器人关节结构中往往在电机后会配有大减速比的谐波减速器或者 RV 减速器，而减速器中的摩擦力较大，难以忽略，因此直接由电流来计算关节力矩控制量，使得模型十分不准确。不仅如此，其摩擦力的大小不仅和关节的速度，还和润滑程度、机器人位姿、温度等有关^[23]。所以摩擦力的建模很难描述，这种电流检测的方法就变得不准确。一般为了更准确的建模，会直接在关节最后输出处加上力矩传感器，保证了在机器人动力学方程中的驱动力矩是准确的，此外还能提高单关节力矩控制特性的带宽。德国航天太空宇航中心(DLR)开发的轻载机器人(LWR)就是使用这样的设计^[24]，如图 1-9 所示。但是这种设计如果是七自由度冗余机器人就会需要七个力矩传感器，而好的力矩传感器往往价格不菲。不仅如此，这种方式还需要更改机器人的关节设计，所以这种方案在现有的工业机器人上往往很少使用。

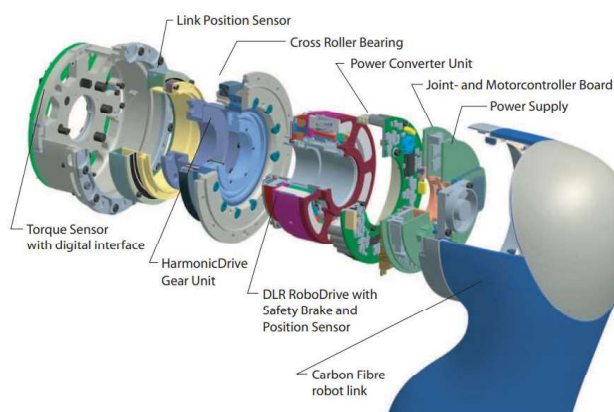


图 1-9 LWR 的关节硬件设计

工业上用得最多的还是腕力传感器。腕力传感器一般又叫做六维力传感器，常用都是十字梁式，通常分为两层（上下或者内外），一层与机器人末端法兰直接固定，另一层与工具固定，在中间十字梁材料的表面贴上应变片，可以将作用在工具端的力和力矩转化成可以测量的位移量，如图 1-10 所示。一般六维力传感器结构紧凑，图 1-11 中就是一款六维力传感器，具有很高的精度，而且通常情

况具有很高的刚度，其本身的位移变形可以忽略不计。腕力传感器通常安装在机器人的末端法兰盘上，这就意味着只有机器人末端受到的力才能被检测出来，直接对机器人某个中间零件的施力将无法被检测到。

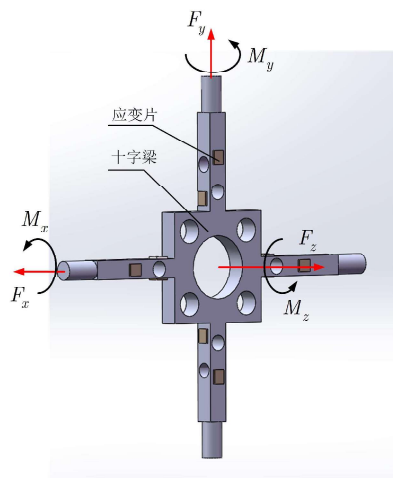


图 1-10 十字梁式传感器受力原理



图 1-11 ATI 公司六维力传感器（Mini40）

在有合适力传感器时，就可以使用力控制控制算法控制机器人。针对不同的任务和不同环境几何特点的情况下，一个直观的想法是，在对力有要求的方向使用力控制，在对位置有要求的方向使用位置控制，从而实现力位混合控制。

1.2.3 力位混合控制研究现状

1981 年 Raibert 和 Craig 提出的力位混合控制正是基于将位置和力的方向进行分解的一种思想^[25]。基于不同任务操作特性的特点，提出自然约束和人工约束的概念，自然约束是根据机械臂末端与工作环境之间的任务决定约束条件，人工约束包含需要控制的力和速度。选择矩阵 S 根据任务的特点把机器人运动空间变成两个互补正交的子空间，在力空间进行力控制，在另外一个互补的位置空间进行位置控制。这时候与环境交互的问题变成了单纯的几何约束问题，其控制框图见下图 1-12 所示，图中 I 为单位矩阵。

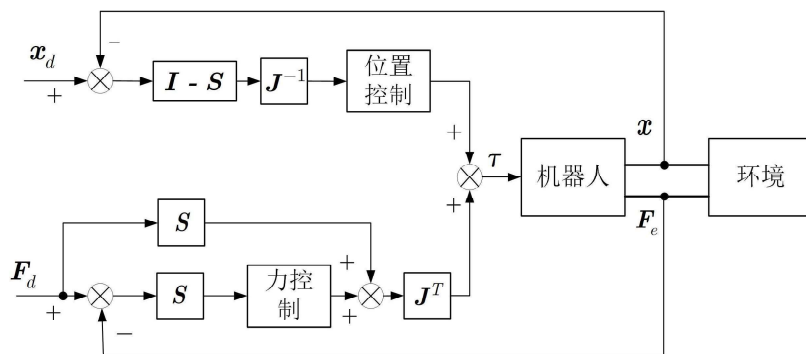


图 1-12 传统力位混合控制

关于以上的传统力位混合控制（R-C 控制器），注意到从电机输入力矩的角度而言，输入分为两个部分：位置控制回路这一回路可以使用现有的位置控制器；基于力的回路需要直接计算出电机输入力矩。如果使用伺服驱动器，那就需要驱动器开放力矩环，而大部分的控制器的功能或者需要重新修改配置；其次，在实际的应用中，力控制器往往也是具有很大的测量噪声，对于通过力控制得到的力矩并没有那么可靠，从而可能会导致机器人出现不稳定的现象^[26]。因此，有学者将图 1-12 力控制的部分也整合到位置控制的输入之中，这样最后控制效果就取决于位置控制的精度^[27]。由于这种是将力转化为位置来执行，所以这种控制又被称为间接力位混合控制。相比较而言，图 1-

12 中的直接力控制由于有直接的力闭环, 因此具有较好的期望力轨迹的跟踪性能和较快的力响应速度, 而间接力位控制则具有较好的鲁棒性^[26]。之后日本学者 Yoshikawa 在此基础上考虑了更一般的曲面接触表面的约束表达式^[28], 并将机器人的动力学考虑进去, 实现了更通用的力位混合控制。Chiaverini 等提出不使用选择矩阵 S , 而是基于优先级策略管理的方式来解决力和位置之间的冲突情况: 力控制回路优先于位置控制回路。这样可以确保与期望力轨迹的有限的偏差, 从而保证在意料之外的碰撞时可以快速恢复^[29]。

力位混合控制策略中由于本身就包含环境的信息, 这意味着对于无穷刚度的接触面来说这是最有效的交互控制^[30], 所以在打磨抛光领域大量应用力位混合控制^[31-33]。但是实际应用中, 总有一些情况环境的信息是被简化的, 或者根本没有办法得到精确的柔性环境模型, 这时控制效果就变得一般。可以发现以上策略都是直接对力的稳态误差进行 PID 控制, 还有一类是通过运动控制系统末端执行器期望姿态而间接控制相互作用力, 阻抗控制就是其中一种。

1.2.4 阻抗控制研究现状

阻抗控制最早由 Hogan 在 1984 年提出^[34], 阻抗控制本身更确切的说是一种控制思想, 主要思路是建立机器人末端位移与接触力之间的关系, 一般将其等效为“质量弹簧阻尼”的模型, 见图 1-13。Hogan 认为在机器人的作业工程中同一个任务的操作环境可能会经历不同的阶段, 而保证所有的阶段都是稳定的是很难的, 所以希望设计一个对环境不敏感的控制^[35]。这种单个阻抗控制器就可以在所有的预期环境中运行而不影响其稳定性, 这是相比于其他控制的显著优势。

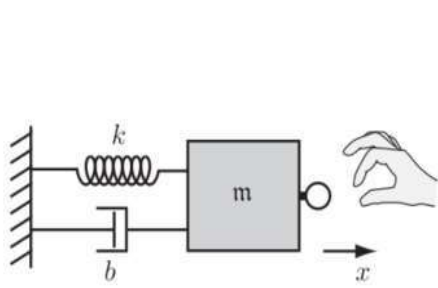


图 1-13 阻抗控制思想

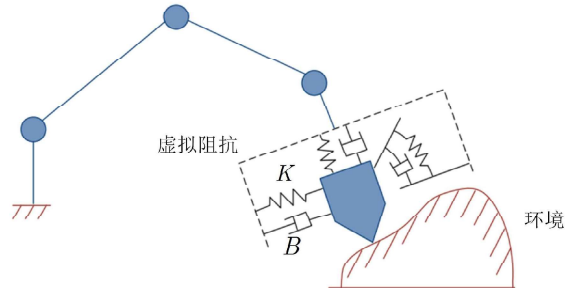


图 1-14 笛卡尔空间阻抗控制示意

一般针对具体操作任务都是在笛卡尔空间进行的, 所以阻抗控制是在笛卡尔空间的虚拟特性^[36], 如图 1-14 中机器人接触外界环境时展现的柔顺特性。从图中可以看出, 在机器人末端执行器加入阻抗控制相当于在机器人加入虚拟的弹簧和阻尼, 这种能力保证了当机器人遇到环境(预期, 非预期)都会产生一种类似欠让的特性。而根据弹簧阻尼的特点, 如果稳定性可以保证, 那么意味着, 末端执行器对环境的作用力可以用虚拟弹簧的变形来表示。这就是 Bruno Siciliano 将阻抗控制定义为间接力控制的原因^[21], 形象的说, 即可以通过调整弹簧的变形量来控制接触力。

就阻抗控制的实现而言, 与之前介绍的力位混合控制类似, 一般有基于力矩的阻抗与基于位置的阻抗两种, 而后者也被某些研究者称为导纳控制^[37], 本文将在第三章详细介绍这两种控制并比较其特点。总体来说基于位置的阻抗在实现起来比较方便, 所以在实际应用场景用的较多, 其方便的原因是基于位置的阻抗就是最终将由阻抗参数算出的量作为位置量给运动控制器, 但是这个方法有一个前提, 需要位置控制回路的带宽远大于力的阻抗控制的带宽, 因为此时位置控制回路是阻抗控制回路的内环。

如果图 1-13 中所表示的三个参数为恒定的, 不随时间发生变化, 这样可以满足机器人示教或者一些不精确的任务, 此时对于抵御外界的干扰来说已经足够了。但是当需要精确的力控制时, 单纯的使用传统的阻抗控制就不能满足要求, 因为环境的位置和刚度系数必定没有办法准确的获得, 这时候一般有两种方法来弥补这种不足: 一种是通过自适应来不断修正环境的参数最终达到理想的控制目标^[38,39], 例如 Seul 使用神经网络补偿机器人模型中的不确定性, 给出了该算法对力传感器噪声

和不准确环境位置测量的鲁棒性分析^[37]；另外一种是将阻抗控制的三个参数修改成随时间可变的，即该系统变成了非自治系统。在本文中称这种方法为变参数阻抗控制。

变参数阻抗是近些年研究的热点，事实上它并不仅仅是机器人控制所具有的特点，大量的控制是受自然中生物的启发。例如人的手臂当关节的位置不变时，人体可以通过激活两个肌肉来改变手臂的刚度，这意味着变参数控制中，机器人可以模拟肌肉的特性改变自身刚度以满足不同的柔顺性的需求^[40]。此外 Ikeura 通过改变检测当前的速度，把阻抗控制分成两个分段函数，当速度变大时，减小阻尼系数^[41]。而 Seraji 和 Colbaugh 针对力跟踪问题，提出了直接和间接自适应控制两种策略，两种方法能够很好的抵抗环境位置与环境刚度的不确定性^[39]。Seul 学者研究了大量关于力跟踪问题的变阻尼自适应控制^[37,42,43]，不仅控制律极为简单，而且还给出了稳定性的边界条件。段晋军等人在此基础上，将此控制律用在基于位置控制的机器人上，并实现了很好的力跟踪效果^[44]。Lee 等人模仿肌肉变刚度的性质，将刚度系数值变成力误差的 PD 控制输出，拓展了刚度系数，使之可以是负值^[45]。之后有学者将阻抗控制用在不同的领域，例如墙壁清洁^[46]，上肢康复外骨骼^[47]，和微型 XY 平台^[48]等。除此此外，深度强化学习^[49]，最优化控制^[50,51]等方法也大量用于变参数阻抗控制。

由于变参数的阻抗控制的引入，使得在稳定性证明方面就变得很困难。当增益恒定时，根据无源性分析，阻抗控制回路是无源的、环境是无源的，所以系统是稳定的，但是当变参数阻抗引入使得这种无源性就丧失了。最早 Lawrence 等给出了单个笛卡尔自由度下的传递函数，并通过图示方法给出不同参数的稳定性条件^[52]。Ferraguti 等人利用能量罐原理（tank-based）给出了一种方法，将任何耗散的能量添加到虚拟的能量罐之中，从中可以提取合适的能量以实现刚度变化^[53]。Klas Kronander 等提出一个基于状态无关的稳定性约束条件，将刚度以及刚度的时间导数与阻尼系数联系起来，得到了在稳定条件下的更好的变刚度跟随效果^[54]。

1.2.5 机器人柔顺力控制应用

机器人在柔顺力控制的应用场景主要集中于以下几个方面：在传统的打磨等控制中，主要还是应用力位混合控制等传统的控制算法，但是大多数针对小型零件其柔顺性表现在使用具有柔顺性打磨砂带机中^[55]，如图 1-15(a)所示，砂带机中的张紧装置可以调节力的大小，从而给与打磨力以缓冲。而 DLR 第二代轻量级机器人主要的研制目标就是使用阻抗控制来控制机器人关节力和位置之间的关系，该机器人可以很方便的用来依照任务的特点控制机器人本身的刚度，使用人手示教可以方便的将轴插入到孔中，在图 1-15(b)中将转动的刚度设的很大，而平移的刚度设定很小^[56]。而对于机械臂和机器人手可以使用不同的阻抗特性的思想，设计出具有类似于宏微机器人的特点的双臂机器人，示意图如图 1-15(c)所示^[24]，图中黑色标线表示手指的阻抗，而白色的标线表示手臂的阻抗，这些虚拟弹簧共同限制了机器人的运动，利用这种特性可以拧开罐子的盖子。对于用于康复的上肢外骨骼，如图 1-15(d)所示，病人的在不同时期往往需要不同的康复力，而对于阻抗控制这种主动力控制可以方便改变参数以让病人更好的训练萎缩的肌肉^[57]。而 HyQ 四足行走机器人^[58]，如图 1-15(e)，在蹬地的过程中，为了较小在接触过程中震荡，在腿的关节做出关节虚拟阻抗特性，可以根据蹬地力改变关节的角度，增加行走过程的稳定性。图 1-15(f)中双臂联合操作任务^[59]将每个机器人与操作物体之间阻抗特性，称为内部阻抗，而被操作物体与外接环境之间的干扰被称为外部阻抗。这些都是近年学者尝试使用主动力柔顺控制解决复杂任务的例子，尤其是交互力控制或者结合环境特点的应用场景。

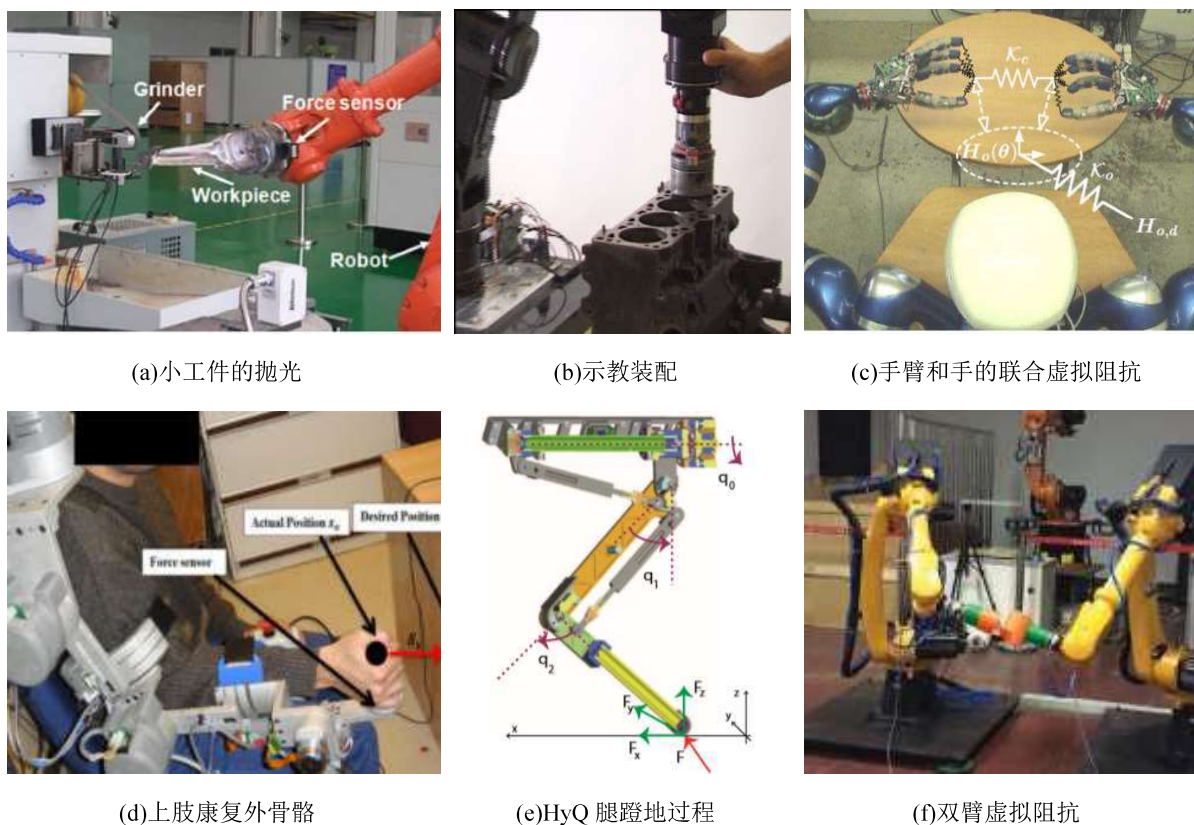


图 1-15 柔顺力控制算法的机器人应用

1.3 论文研究意义及内容

目前大部分的机器人应用只是停留在位置控制上，在几乎所有工业应用中，应用场景还是使用 RCC 或者如图 1-15(a)中都是将柔顺特性做在外部机构中。国内大部分针对机器人主动柔顺研究都集中在学校中，然而这中间绝大多数都是使用从机器人厂家购买的现有位置控制的机器人的基础上，所以如果对阻抗控制而言，所做的工作就集中在阻抗控制的力外环中；如果是为了完成具体的任务，主要的工作便集中到任务的规划中，并没有很深入的讨论阻抗控制及其力控制的应用本身；即使有讨论算法，也都是基于简单的模型例如二自由度平面机构的仿真。本文虽然在讨论控制算法时使用了仿真工具，但是该仿真工具是一种通用的仿真方法，对于复杂的机器人构型也可以很好的完成算法的验证。对论文中提及的算法，本文是尝试从电机的位置控制开始构建了自己的机器人控制软件，这样可以更好的了解机器人主动柔顺控制各部分之间的算法关系。

本文将会采用阻抗控制作为主要控制算法进行研究，对算法进行 Simulink 仿真及控制原理的验证，并且完成机器人软件的编写，最后基于实验平台实现控制算法并验证其合理性。这将为后续实现更为复杂的实验平台提供了理论依据和实现上的参考。本文将会一共分成六章，各个章节的内容安排如下：

第一章介绍了关于机器人力控制和柔顺控制的背景，将介绍被动柔顺的一些研究现状和主动柔顺控制的一些经典算法，其中重点介绍力位混合控制和阻抗控制的特点和针对这些算法的研究进展、目前研究的热点方向和目前针对这些算法的不同任务的应用场景等，从这里引入了本文的研究意义和主要研究内容。

第二章将会推导实验平台基于 SCARA 机器人的正向运动学、逆运动学、雅克比矩阵等数学基础。将会使用较为新颖的机器人仿真工具 Simscape Multibody 和 Robotics System Toolbox 两个工具箱进行基于三维模型和动力学的仿真，并将由工具箱构建计算力矩的位置控制器，为下一章的基于

位置的阻抗控制提供了位置量的输入模块。

第三章将会在第二章的基础上推导了基于力矩的阻抗控制和基于位置的阻抗控制的理论，并分析两者间的区别，进而引入与环境交互的时候的力控制，使用两种不同变参数阻抗实现力控制。

第四章将会介绍固高运动控制卡的特性，并会使用板卡的位置控制器建立机器人关节与电机位置之间的关系，将由此向上通过软件编写机器人的运动学层、力的刷新层、阻抗控制层等。并将针对板卡的特性，对阻抗控制进行合理的简化。

第五章将会在实际的机器人上对第四章进行实验验证，并为了实验中更好的检测数据，介绍基于 socket 的通信方式将运行过程中的数据取出，进而通过三维重建实时显示出机器人的运行状态，最后将会得到阻抗控制和力控制的实验结果，证明其可行性。

第六章将会总结本文在研究中所用的算法、方法和具体的实现过程，分析其中不足之处，以及可以继续在此基础上改进的地方，并对未来的发展和研究进行展望。