

第 1 章 绪 论

1.1 机器人应用概貌及机器人学的主要研究领域

自 20 世纪 80 年代以来,在全球范围内 ,FMS(Flexible Manufacturing System 柔性制造系统)技术和 FA(Flexible Automation, 柔性自动化)技术正蓬勃兴起。而其中具有操作功能多样性的工业机器人更是倍受关注,被公认为是新的自动化时代的核心技术^[1,2],它与可编程序控制器(PLC)、计算机数控(CNC)一起构成了现代产业的三大支柱。

近年来,随着我国改革开放政策的贯彻,经济建设有了长足的发展。在工业企业界,愈来愈多的厂家已经采用了机器人来充当生产过程中的重要角色。将机器人视作遥远的、为发达国家专有的先进生产设备的历史已经成为过去。我们再也不用仅仅通过电视或其它媒介来旁窥机器人的尊容了。事实上,在中国的一些大中型城市,要想亲眼目睹工作中的机器人,现在已不是一件十分困难的事情了。

机器人的应用相当广泛,如用于航空航天、水下作业、极端危险场所(如核电站、火灾、地震现场等)、工业生产、军事、医疗、日常生活、福利,直至娱乐等领域,所用的机器人名目繁多、应有尽有,不胜枚举^[3~9]。

机器人学(robotics)是一门高度综合和交叉的新兴学科,它涉及的领域很多,诸如机械、电气、工艺、力学、传动、控制、通信、决策、生物、伦理等诸多方面。但从控制的角度来看,其中最主要也

是最基本的是机器人的运动学 (kinematics) 和动力学 (dynamics) 问题及相应的控制策略研究^[10]。

机器人运动学包括前向运动学 (forward kinematics) 和逆运动学 (inverse kinematics) , 或分别称为运动学的正问题和逆问题。其中, 前向运动学研究以机器人的各关节参数 (广义坐标) 来决定终端操作器 (end-effector) 的位型 (position and orientation) 而逆运动学则是研究由期望的终端操作器位型来得到各关节变量的过程。显然, 由于机器人这种空间连杆机构的复杂性, 逆运动学问题比起其正问题来说要复杂得多。

机器人动力学问题主要包括两大类, 即运动分析和力分析^[11]。前者研究由机器人连杆系的受力情况 (外力和关节驱动力) 决定各关节运动状况 (位置、速度和加速度) 进而通过运动学方法来最终获得终端操作器位型的过程和方法; 而后者则是研究由期望的机器人各连杆的运动 (位移、速度和加速度) 得到需施加于各关节处的驱动力或力矩的方法和策略, 即我们通常所说的控制综合问题^[11~16]。

本书就是从机器人的控制综合方面着手展开论述的。

1.2 机器人控制技术的发展与现状

众所周知, 符合国际标准化组织 ISO 严格定义 (ISO/TC184/SC2: TR8373: 1988) 的第一台工业机器人 Unimate 在 20 世纪 60 年代初已在美国新泽西州的一家通用汽车制造厂 (General Motors) 安装使用^[4]。该产品在 60 年代中后期出口日本^[17,18], 80 年代中期起, 工业机器人的研究与应用在日本迅速发展并步入了黄金时代。进入 90 年代, 日本国内的机器人装机数量约占全世界总装机台数的约 60% (截止 1991 年底, 日本使用的机器人达 324895 台, 而同期装机逾万台的国家还有苏联 65000 台、美国 44000 台、德国 34140 台、意大利 14700 台) , 雄居全球机器人制造和使用大国的地位^[1]。另据联合国欧洲经济委员会的统计, 1996 年现役机

机器人的数量，日本为 399629 台、美国 70858 台、德国 60000 台、意大利 25363 台、法国 14784 台。估计 2000 年止，上述国家的服役机器人数量依次达到 527500 台、99200 台、76900 台、34600 台、19000 台，且英国也 12300 台。

相对于机器人的总体技术进步来说，其相应的控制部分的发展则显得比较缓慢。时至今日，大部分实际生产的工业机器人仍以采用 PID 加前馈 (feedforward) 的控制方案为主流^[19]，由此可窥一斑。为究其原因，有必要先对控制理论的发展及特点作一简单回顾。

1.2.1 控制理论发展历史及现状

控制理论的发展经历了几个阶段：①20 世纪 50 年代为发展成熟的针对单输入单输出 (SISO) 线性系统控制分析与综合的频域方法；②60 年代开始针对多输入多输出 (MIMO) 线性多变量系统控制和综合的现代控制理论；③在前二者对线性系统透彻而极富成果的研究与应用基础上，近十年来，随着人们认识世界的不断深入和要求的不断提高，非线性控制已成为当代控制界普遍关注和主攻的方向^[20]。

非线性系统与线性系统相比较，其复杂性要大得多，且其研究方法也呈多样化的特点。对于非线性系统的控制分析与综合问题，迄今为止还没有一种公认的、万用的、能实施像线性系统那种风格的分析与设计的理论和方法。

一种容易理解的方法是，将非线性系统进行某种变换，以期能利用现有的关于线性系统理论来进行非线性系统的研究，这就是著名的反馈线性化理论 (feedback linearization)^[21]。但是，线性化方法毕竟有其局限性，主要体现在：非线性系统的许多特性或现象在线性系统中是不存在的，比如非线性系统的自振荡、非线性共振 (包括主共振、分频共振和倍频共振) 异步激发和异步熄灭，还有混沌 (chaos) 现象等。显然，如要对这些现象进行研究，仅以反馈线性化后的模型来讨论，是不现实的。所以，人们继而提出了谐波线性化的方法^[22]。

由于非线性系统在理论研究上具有巨大的复杂性^[23] 再考虑到在实际中各种非线性控制问题的不断涌现，目前的一种有效做法是：人们在暂时尚无完善的理论体系的情况下，先绕过理论分析而直接深入到其控制综合的中心问题。属于这种情况，目前研究得较多的有：变结构控制和各种智能控制方法（包括人工神经网络控制、模糊控制、学习控制等）。

智能控制（intelligent control）的概念由傅京逊于 1971 年提出^[24]，由 Saridis 等人在此基础上于 1977 年进一步提出了一种智能机器（intelligent machine）的统一结构框架^[25,26]。该结构现已被控制界普遍接受，它具有递阶分散智能与精度的特点，包括组织级（organization level）、协调级（coordination level）和执行级或控制级（execution level）且各层次间遵循 IPDI 原则（increasing precision with decreasing intelligence）。

从控制工程实际应用的角度来看，智能控制系统的结构和特点如图 1-1 所示。

智能控制是随着被控对象的日益复杂，为适应其对环境依赖的不可分割性而产生的。作为一个新兴的学科，它融合了包括神经生理学、心理学、运筹学、控制论和计算机科学的多学科思想和技术的成果。而对智能控制的研究，主要体现在对基于知识系统（Knowledge based system, KBS）模糊逻辑（fuzzy logic）和人工神经网络（artificial neural network）的研究^[27,28]。此外，从随机过程（stochastic process）的角度来研究智能机器人的工作也在进行^[29]。

模糊控制源于模糊数学，或称弗晰数学（fuzzy mathematics），是研究如何表现和处理模糊性现象的一个数学分支^[30~33]。它所研究的不确定性不同于概率论所研究的随机性，而是人脑中相应概念的模糊性。伊朗裔美国数学家 L. A. 札德于 1965 年发表了创始性的论文“模糊集”从而触发了对模糊数学的广泛而深入的研究^[34]。其基本的概念为模糊集，涵盖了普通集合，即将普通集合视为模糊集的一个特例，故由此而对传统的以集合为基本概念的各数学分支产生了一次质的拓展。在引入了隶属度函数（mem-

bership function) 的模糊集之后，与普通集合相关的各种结论均需重新推证其模糊形式的“版本”。因此，模糊数学具有广泛的研究背景和实际的应用潜力。目前，模糊数学已经在控制、气象、地震、地质、测绘、石油、计算机、心理、社会、生物和医学等方面逐步得到应用 [35]。

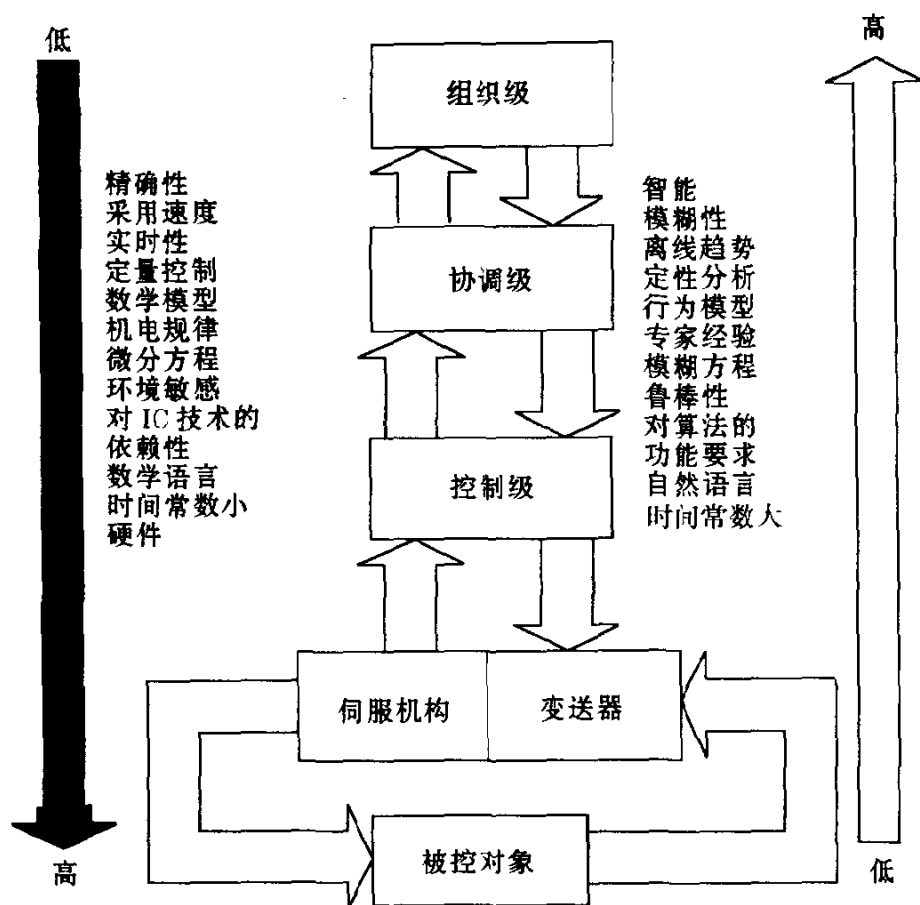


图 1-1 智能控制系统的结构与特点

模糊控制系统是一种具有鲁棒特性的智能控制方案。在控制界颇具争议的“模糊实质并不模糊”这个问题可从两方面来看。一方面，它能容纳模糊的概念，在这一点上，它是模糊的，或者更准确地说，它是和模糊概念兼容的。正由于此，它才显得对人们的自然语句非常友好。另一方面，它的任何一个与模糊有关的概念又都被一个隶属度函数所唯一精确地刻画。此时，它又是非常分明的，毫无“含糊其辞”的嫌疑。因此，也可说它是清晰的 (crisp)。此外，

我们还应指出：尽管隶属度函数唯一地刻画模糊子集，模糊子集又与人们的习惯语言相沟通，但人们在运用自然语言时，并未明确或隐含或默认地给出其相应的隶属度函数，故人们在谈论模糊控制时，还是留下了一个“盲点”。从另一方面看，它又给人们以新的启发，譬如说，可利用智能控制的上层结构来学习人们在潜意识中使用的隶属度函数。这个盲点同时还意味着：融入了专家或熟练操作人员的控制系统往往是一个不确定性的系统，其不确定性正是源于这个盲点。

对于模糊控制系统的研究，同样存在着各种各样的理论和方法，一种自然的方法便是探索能否将一般的模糊系统转化为我们所熟知的线性系统的形式加以研究。在这一方面，印度裔加拿大学者古普塔 (M. Gupta) 进行了卓有成效的工作^[36,37]，他的出发点是形如下式的模糊语句：

$$\begin{aligned} &\text{IF } x_1 \text{ is } X_{1(i)} \text{ and } x_2 \text{ is } X_{2(i)} \text{ and } \cdots \text{ and } x_n \text{ is } X_{n(i)} \\ &\text{THEN } y_1 \text{ is } Y_{1(i)} \text{ and } y_2 \text{ is } Y_{2(i)} \cdots \text{ and } y_m \text{ is } Y_{m(i)} \end{aligned} \quad (1-1)$$

在一定的条件下，将此模糊系统转变为由下述形式的模糊方程 (fuzzy equation) 所描述的系统：

$$Y_m = X_1 \circ R_{1m} \Delta X_2 \circ R_{2m} \Delta \cdots \Delta X_n \circ R_{nm} \quad (1-2)$$

式中各符号含义参见 2.3 节。再由此推导出：① 类似现代控制理论中的各有关环节的框图，如串联、并联、串并联和反馈回路；② 子系统和复合系统等的相应模糊方程的相互关系，从而使整体研究思路清晰明了。但是，由于此方法的前提是以牺牲转化后系统的精确度为代价而得到系统模糊方程的，且与线性系统对应的大量理论问题如系统的能控性、能观性和稳定性等等尚有待更进一步的研究，故在对线性系统和实时性要求不高的场合，它能较好地发挥作用（因此可用于组织级或协调级的实施）。但在实时性要求较高的控制级，尚不能有效地发挥作用。

变结构控制是 20 世纪 50 年代末在苏联诞生的，其鼎盛时期则出现在最近的一二十年间^[38]。这种控制系统的研究既有别于从对象的精确模型入手的基于现代控制理论的研究方法，也不同于

典型的智能控制方法，它主要是从整个控制系统的鲁棒性出发，来研究控制器的综合问题。因此，我们认为它是处在现代控制理论方法与智能控制方法之间的一种流派。在本书的第四章和第五章中，我们将具体详细地研究变结构控制与智能控制之间的关系，并阐述所得出的研究成果。

以上是从控制理论发展规律的角度出发所作的简要概括。下面，从工程应用的角度出发，我们认为可把控制理论与技术模块化，即将其划分为几大类“工具”进行研究，它们是：标准工具、工程工具和应用工具。

其中，控制系统分析与综合的最基础的工具是：矩阵理论、近世代数、微分几何、模糊数学、现代控制理论、最优控制理论、自适应控制理论等，我们将这些统称为标准工具。标准工具可提供一个基础的、稳定的控制系统整体框架。还有一类工具，包括模糊控制、神经网络控制、变结构控制、遗传算法、混沌控制、 H_∞ 控制、逆系统控制、预测控制等，我们将这些统称为工程工具。它们实际上是整个控制系统中的一个结构框架或环节，也可称为一个模块。最后一类是应用工具，它只是其中的一个或几个环节的具体实现过程或方法。

应用工具是一种半标准工具，它的性质和作用介于标准工具和工程工具之间，对所有的理论分析都需要使用这一类工具，如常见的稳定性分析方法。但是，在不同的场合它的使用又有着较大的差别。稳定性分析是对一个控制系统的定性分析，往往还可导出相关的控制律和 / 或参数的自适应律。要进行控制器的设计，应使用相应的工具。

1.2.2 机器人控制技术的发展

对机器人从不同的角度可进行各种各样的分类，如可按照机器人系统的动力来源、应用场合、机械构造形式、功能和控制方法来分。从对机器人的控制方式来看，可将机器人划分为非伺服控制 (nonservo) 和伺服控制 (servo) 从终端操作器的运动特性来看，可分为点对点控制 (Point To Point, PTP) 和连续路径控制

(Continuous Path, CP)两大类^[1]。就这一方面来看,与 NC 技术并无多大的差别,早期的机器人系统,由于需完成的任务比较简单(如抓取、移动和放置工件等)对动态特性要求不高,故可看作是相互独立的各关节位置伺服控制器的简单组合^[39]。

终端操作器的 CP 控制则不同,它对终端操作器所经历的整个过程中位置、速度甚至加速度都有一定的要求,故对控制系统的性能要求更高。此时,仍独立地考虑各关节的控制已不能满足要求,而必须涉及到各关节间的耦合、外力的干扰、工作环境等的影响。

要实施高质量(高速高精度)的控制,首先就要建立机器人系统的动力学模型^[40]。一种广泛使用的 n 自由度刚性机器人动力学方程具有下面的形式:

$$D(q)\ddot{q} + C_1(q, \dot{q})\dot{q} + \phi(q) = \tau \quad (1-3)$$

式中, q 为关节广义坐标, $D(q)$ 为惯性矩阵, $C_1(q, \dot{q})\dot{q}$ 包括离心力(centrifugal)和哥氏力(Coriolis)项, $\phi(q)$ 为重力项。而 τ 为施加于各关节上的广义力。各向量或矩阵均具有适当的维数。写成更明确的形式为

$$\sum_j d_{kj}(q)\ddot{q}_j + \sum_{i,j} c_{ijk}(q)\dot{q}_i\dot{q}_j + \phi_k(q) = \tau_k \quad (1-4)$$

式中, $k = 1, 2, \dots, n$ ^[14]。

由此模型中各变量的物理含义,我们可看出:它是一个强耦合、高度非线性的关于关节变量的 2 阶常微分方程组。具体地说,其惯性矩阵 $D(q)$ 随机械臂的位型 q 的变化而呈复杂的含三角函数关系等的变化;且一般来说,任何一个关节变量的 2 阶方程显含其它的关节变量,具有不可分割的耦合性。

在机器人以慢速运行时,可将其关节间的耦合作用视作干扰而采用独立关节控制(independent joint control)原则,例如针对各关节可方便地构成 PID 控制。

另外,基于上述模型,还可采用频域分析和现代控制理论的各

种控制思想构成如前馈控制的逆动力学方法 (inverse dynamics)、解耦控制、反馈线性化控制等^[41,14,15]。

这些控制方法有一个共同的特点，即它们都强烈地依赖上面的数学模型。在精确知道系统模型时，能得到很好的控制效果。然而，由于在实际应用中机器人参数不可能足够精确（建模过程中的各种假设等近似处理），或由于存在一些未建模特性，再加上不可避免地存在一些干扰项（如终端操作器拾起物体，其重量不可事先知道或确定），使得这些方法不能单独得到实际应用，必须针对这些不确定因素相应地改造控制框架，这就提出了鲁棒控制问题。在这方面具有代表性的方法为自适应控制、非线性补偿控制、基于李亚普诺夫第二法的各种不同的设计方法等^[42~45]。

在研究被控对象的模型存在不准确性（当然包括不确定性或不精确性）及与未知环境交互作用较强情况下的控制时，与上述思想不同的另一个有效途径、也是近年来迅速得到关注的，是各种智能控制方法。迄今为止，智能控制方法已在多个方面得到了广泛的应用，尤其以模糊控制的工程应用最为突出^[46]。

近年来，随着人们对机器人高速高精度要求的不断提高，使得整个机器人系统对其控制部分的先进性需求也越来越迫切，将控制理论的最新成果引入机器人来研究和开发具有智能的机器人已是大势所趋^[17,18,47~56]。

1.2.3 机器人的智能控制现状分析

智能控制的特点之一，就是将传统模型的范畴进行拓展而成广义模型^[57]，即对传统的模型由微分方程或差分方程的表达形式加以扩充，以容纳各种形式的行为模型 (behavior model/performance model)。而且可用人类自然语言的形式来描述。

近年来在机器人的智能控制方面，无论是理论研究还是实际应用方面都取得了一定的进展。

在机器人的神经网络控制方面，CMAC是应用得较早且相当成功的解决方案之一^[58,59,10,60~63]，它的最大特点就是实时性

好，尤其适合于多自由度机械臂的现场学习控制。W. T. Miller 等进行了实物实验，采用可编程逻辑阵列（PLA）制成了专门芯片，从硬件上实现了 CMAC 的控制^[64~67]，其学习机制的理论分析较 Albus 的算法，也有了较大的进展。J. Militzer 等还用严格的数学方法论证了各种算法的收敛性及其函数逼近能力的特性^[68~71]，从而为这方面进一步发展提供了新的可贵的基础。需要进一步研究的主要是其训练算法和冗余参数的选择问题。对此方法在各性能方面的改进也是一个研究的热点^[72,73]，更详细的情况，参见 3.1 节。

对机器人的模糊控制方面，人们进行了大量的研究工作。在理论方面 J. J. Buckley 等论证了模糊系统的逼近特性^[74,75]。模糊控制应用的先驱、英国的 E. H. Mamdani 首次将模糊控制运用于一台实际机器人，从实验方面展现了模糊控制在此方面的应用潜力^[76,77]。此外，模糊系统在机器人的建模^[49]、控制^[78,79,16]、对柔性臂的控制^[80,81,48,50~53]、力/位置控制^[82]、模糊补偿控制^[83]、对基于传感器的机器人控制^[84]以及移动机器人路径规划^[85,86]等各个不同层面都得到了广泛的应用和研究，更详细的情况，参见 5.1 节。

另外，变结构控制系统极其可贵的独特鲁棒性理所当然地决定了其在机器人控制方面的应用研究会较深入且富有成果^[87~98]。众所周知抖振（chattering）是阻碍变结构实际应用的致命原因，对其固有的抖振进行削弱的各种改进算法也被陆续地提出来，如设计滑动扇区以取代原有的切换直线^[99]、动态调整滑模参数^[100]、在线估计滑模参数^[101]、设计非线性的滑动流型以取代线性切换面^[102]等。关于变结构控制更详细的情况，参见 4.1 节。

在上述三种智能方法单独研究的基础上，其间的交叉融合研究也同时在进行^[103,104]。如模糊控制与神经网络的融合研究^[105~112]、神经网络与变结构控制的融合研究^[113,114]以及模糊控制与变结构控制的融合研究等^[101,115~118,49]。其目的是扬长避

好，尤其适合于多自由度机械臂的现场学习控制。W. T. Miller 等进行了实物实验，采用可编程逻辑阵列（PLA）制成了专门芯片，从硬件上实现了 CMAC 的控制^[64~67]，其学习机制的理论分析较 Albus 的算法，也有了较大的进展。J. Militzer 等还用严格的数学方法论证了各种算法的收敛性及其函数逼近能力的特性^[68~71]，从而为这方面进一步发展提供了新的可贵的基础。需要进一步研究的主要是其训练算法和冗余参数的选择问题。对此方法在各性能方面的改进也是一个研究的热点^[72,73]，更详细的情况，参见 3.1 节。

对机器人的模糊控制方面，人们进行了大量的研究工作。在理论方面 J. J. Buckley 等论证了模糊系统的逼近特性^[74,75]。模糊控制应用的先驱、英国的 E. H. Mamdani 首次将模糊控制运用于一台实际机器人，从实验方面展现了模糊控制在此方面的应用潜力^[76,77]。此外，模糊系统在机器人的建模^[49]、控制^[78,79,16]、对柔性臂的控制^[80,81,48,50~53]、力/位置控制^[82]、模糊补偿控制^[83]、对基于传感器的机器人控制^[84]以及移动机器人路径规划^[85,86]等各个不同层面都得到了广泛的应用和研究，更详细的情况，参见 5.1 节。

另外，变结构控制系统极其可贵的独特鲁棒性理所当然地决定了其在机器人控制方面的应用研究会较深入且富有成果^[87~98]。众所周知抖振（chattering）是阻碍变结构实际应用的致命原因，对其固有的抖振进行削弱的各种改进算法也被陆续地提出来，如设计滑动扇区以取代原有的切换直线^[99]、动态调整滑模参数^[100]、在线估计滑模参数^[101]、设计非线性的滑动流型以取代线性切换面^[102]等。关于变结构控制更详细的情况，参见 4.1 节。

在上述三种智能方法单独研究的基础上，其间的交叉融合研究也同时在进行^[103,104]。如模糊控制与神经网络的融合研究^[105~112]、神经网络与变结构控制的融合研究^[113,114]以及模糊控制与变结构控制的融合研究等^[101,115~118,49]。其目的是扬长避

⑩ 诊断和通信功能等。

鉴于上面所列原因，可看出智能化方法往往伴随着对存储容量、运算速度的较高要求（这些与相应硬件的发展水平密切相关），且无论是模糊控制还是变结构控制，抖振现象都会存在。这一点，对于实现高速高精度动特性的目标来说确实是一个巨大的威胁，这或许就是智能控制方法现在暂时还未能商业化运用于工业机器人控制器的原因之一吧。

至此，我们回答了在前面 1.2 节开始处）所提出的问题。为对目前机器人控制器产品的发展水平有一个感性的认识，现将日本在 20 世纪 90 年代商业化工业机器人已达到的主要性能指标列于表 1-1^[18]。

表 1-1 目前商业化工业机器人的主要性能指标

硬件方面		软件方面	
性能	当前实际情况	性能	当前实际情况
控制逻辑部件	ASIC, VLSI	插补功能	函数插补
运算部件	32 位 CPU	编程功能	可编辑机器人语言
存储部件	IC 存储器 (64KB 至数兆字节)	动态控制性能	现代控制理论
伺服控制部分	位置、速度、转矩回路全数字化	顺序控制功能	多任务计算机编程
人机界面	文字显示, 功能键, 键盘, 菜单选择	自诊断能力	自诊断和远程诊断功能
附加功能	内置顺控器, 供控制附加的外部轴	附加功能	内置视觉控制器

冗余机械臂除了执行终端操作器各种任务外，还能完成许多复杂的子任务，例如：避障、节点限制回避、奇异点回避和各种性能判据最优化，包括运动能量、操作器总能量消耗及局部关节力矩等，对其控制采用递归神经网络方法较为有效（详见第七章）。

1.3 本书主要任务简介及内容安排

1.3.1 主要任务

如上所述，目前大部分商业化的工业机器人，其控制器采用“PID + 前馈”的控制策略。换一个角度来考虑，我们可以这样来理解：前馈控制代表了对机器人数学模型的利用，而PID则体现了基于误差的直观的鲁棒校正作用。

基于这一思路，我们认为：即使采用智能控制，也不应该将传统的精确数学模型的要素排除在外，故我们研究机器人智能控制的出发点是，尽可能地对已有数学模型（哪怕是不准确的）加以利用，而不是全部另起炉灶。为此，我们提出采用间接型模糊控制系统来进行最基本的机器人智能控制研究。

从模糊控制的角度来看，知识的使用就是如何利用规则库中的规则进行推理决策的过程；知识的维护、更新就是在原有的系统中加入自适应机制的过程；知识的存储在具体控制策略的实施方面具有决定性的作用，要使其具有分散性和可恢复性，就得借助于神经网络方面的思想与方法。

结合作者所完成的广东省自然科学基金项目：“仿人脑信息处理与控制的人工系统的研究(960304)”、“可自学习与结构可自组织的分级递阶机器人智能控制研究(940004)”、“多关节平面型机器人交流伺服系统的研究(870166)”等所采用的各种智能控制方案为基础，进一步摸索高效实用的机器人智能控制方法，便是本书的主要任务。

具体地说，我们将论述下面六个方面的研究工作：

(1) 提出一种适合于多自由度刚性机器人实时控制的既能利用已有数学模型（允许有偏差）又能融合人类自然语言描述的行为模型的控制算法。相应地，研究其控制器构造、算法的稳定性及其结构自组织、自适应机制并进行计算机仿真试验。

(2) 针对得到的模糊控制系统，研究其抖振削弱的途径与方

法。

(3) 探索和揭示所得模糊控制系统与典型变结构控制系统的内在联系，力图在它们之间架起一座桥梁，把在变结构控制系统中削弱抖振方面行之有效的边界层 (boundary layer) 方法用于所得到的模糊控制系统，进一步研究其反方向的问题，即模糊控制方法对传统变结构控制系统的改造及相关问题。

(4) 对现有的机器人神经网络控制方法的训练机制进行深入研究，以期能在模糊控制与神经网络控制方面建立起一定的联系，为知识的获取、预处理、存储和使用等各个环节提供必要的支持。在此基础上，最终获得一个新型的融模糊控制、神经网络技术和变结构控制思想于一体的高效实用机器人智能控制系统。

(5) 探讨在使用 Matlab/Simulink 软件包对上述任务进行仿真的过程中所出现的仿真原理、方法及有关技巧方面的问题，归纳和总结出智能控制仿真的仿真建模的基本原则、方法与特点。

1.3.2 内容安排

本书拟论述的主要研究内容如图 1-2 所示。

在接下来的第二章中，我们首先以模糊控制为主线索，对模糊集理论及其应用作一个较全面、深入的回顾和总结。在此基础上，从一个现有的模糊控制算法入手，完成上述任务 (1)。另外，为使全书研究的深入展开，在这一章中还介绍了一些预备知识。

对神经网络控制的训练算法的改进及机器人神经网络控制的训练策略安排在第三章中讨论。

在第四章和第五章的前半部分，我们将以削弱抖振的共同目标为突破口，逐步深入地探讨模糊控制与变结构控制系统的内在联系。此外，我们还从一个全新的角度阐述了变结构控制中广泛使用的边界层方法的模糊本质。第五章的后半部分是本书的关键所在，它具体地论述了上述任务 4) 的目标是如何实现的。

第六章具有相对的独立性，它主要描述了在前述章节所进行仿真试验的过程中遇到的一些较专门的仿真问题。

本书最后的“结论”部分，对上述任务的完成情况作了总结，

并指出了今后在此方向上继续研究的设想。

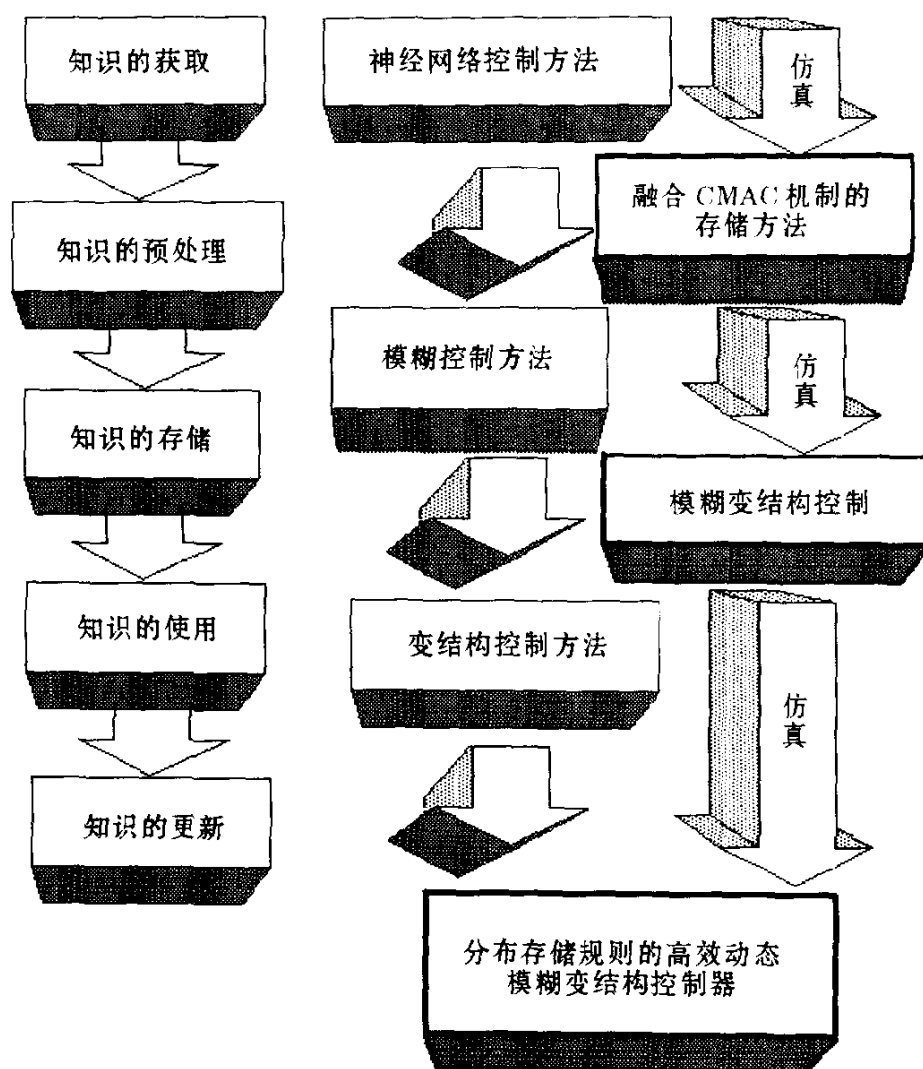


图 1-2 本书研究任务

第 2 章 机器人的模糊控制方法

为使本书的讨论能全面、深入地进行，我们在本章的前半部分，就模糊集理论在控制领域中的应用作一个系统性的分析和总结，并从不同的角度提出一些新的见解；而后半部分则在此基础上对机器人运动控制的具体应用展开理论研究和仿真试验。为便于全书的对比试验，我们将本章的仿真试验单独作为一个小节来介绍。

2.1 基于被控对象行为特性的 模糊系统模型及其获取方法

这类系统可进一步细分为两类：第一类是已有数学模型，且以微分方程的形式表述；第二类是无数学模型描述，仅有自然语言形式描述的行为模型。

本书主要讨论第一类模糊系统模型，即从微分方程的结构出发，得到一个模糊系统的框架。由于这类系统来源于微分方程，因此在推导模糊系统模型的过程中，应当对微分方程加以充分的开发利用，这就是下面将要讨论的一些问题。

我们知道，线性最优控制的结果可以应用到非线性系统的控制中去，其思想是：虽然可针对非线性系统来设计相应的非线性最优控制器，但由于某些条件或某些参数会偏离计算值，从而使原来的计算值变为无效，必须重新计算相应的控制器。而这种非线性的控制器与线性控制器相比，其控制综合的工作量和复杂程度都要大得多，故通常的做法是：利用非线性控制与线性控制之差的线性项来逼近实际的问题，可通过求解一个适当的线性二次型问题来

解决。

以线性系统状态调节器为例，由最优控制理论可知：其控制律可表述成状态变量的线性组合^[94] 即有：

$$\mathbf{u}(t) = -\mathbf{K}(t) \cdot \mathbf{x}, \mathbf{K}(t) = \mathbf{R}^{-1}(t)\mathbf{B}^T(t)\mathbf{P}(t) \quad (2-1)$$

其中各变量的含义在下面的叙述中阐明。

(1) 线性二次型状态调节器问题。设线性时变系统及其初始条件分别为

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}(t)\mathbf{u}(t) \\ \mathbf{x}(t_0) &= \mathbf{x}_0 \end{aligned} \quad (2-2)$$

其中， $\mathbf{x}(t)$ 是 n 维状态向量， $\mathbf{u}(t)$ 是 r 维控制向量； $\mathbf{A}(t)$ 、 $\mathbf{B}(t)$ 分别是 $n \times n$ 维和 $n \times r$ 维时变系数矩阵且它们的元是时间 t 的连续函数。寻找最优控制 $\mathbf{u}(t)$ ，使下列二次型性能指标函数为最小：

$$\begin{aligned} J &= \frac{1}{2}\mathbf{x}^T(T)\mathbf{F}\mathbf{x}(T) + \\ &\quad \frac{1}{2}\int_{t_0}^T [\mathbf{x}^T(t)\mathbf{Q}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{u}^T(t)\mathbf{R}(t)\mathbf{u}(t)]dt \end{aligned} \quad (2-3)$$

其中 $\mathbf{F}$ 是非负定对称常阵， $\mathbf{Q}(t)$ 和 $\mathbf{R}(t)$ 分别是 $n \times n$ 维和 $r \times r$ 正定对称矩阵，且它们的元是时间 t 的连续函数，末态时间 T 是固定的。

采用变分法或极大值原理或连续系统的动态规划，可得出此问题的最优控制的充分必要条件如下。

(2) 线性二次型状态调节器最优控制的充分必要条件。对于上述线性二次型最优状态调节器问题，若所有矩阵及 $\mathbf{R}^{-1}(t)$ 是有界的，则最优控制的充分必要条件是：

$$\mathbf{u}^*(t) = -\mathbf{R}^{-1}(t)\mathbf{B}^T(t)\mathbf{P}(t)\mathbf{x}^*(t) \quad (2-4)$$

其中， $\mathbf{x}^*(t)$ 是相应于 $\mathbf{u}^*(t)$ 的最优轨线， $\mathbf{P}(t)$ 是如下黎卡提 (Riccati) 矩阵微分方程：

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{P}}(t) &= -\mathbf{P}(t)\mathbf{A}(t) - \mathbf{A}^T(t)\mathbf{P}(t) + \\ &\quad \mathbf{P}(t)\mathbf{B}(t)\mathbf{R}^{-1}(t)\mathbf{B}^T(t)\mathbf{P}(t) - \mathbf{Q}(t) \end{aligned}$$