

高等学校试用教材

机电智能控制工程

清华大学 张伯鹏 编著

机械工业出版社

机电智能控制工程

机械

高等学校试用教材

机电智能控制工程

清华大学 张伯鹏 编著



机械工业出版社

前 言

机电智能控制是工业自动化和智能、技艺活动自动化相结合的产物，是建造智能机器、开发智能工程、改善人机系统的理论和技术基础。

十几年来智能控制，从形成学科到取得迅速发展，既是生产发展和社会进步的需要，也是机电一体化技术和计算机科学技术发展的结果。作为一门新兴的、发展中还不成熟的学科领域，提出并有待解决的问题远比已经解决的问题要多。

机电智能控制工程涉及机构学、机械设计学、制造工程、监控检测、控制工程技术、控制论、信息论、博弈理论和运筹学、机器人学、计算机科学技术、接口技术、智能程序设计、语言学、知识工程、人工智能、专家系统和人机系统等学科，但却不是上述各学科的累加或替代。机电智能控制工程试图建立自己的体系，并着重阐述各种机电知识和智能的获取、表示、系统建造及其在智能控制和智能工程中的应用。

本书是从工程应用角度编写的，可供机械工程领域从事制造工程、机械设计的科技人员参考，也可以作为工科大学机械专业师生学习机电智能控制课程的参考书。清华大学自1980年迄今一直为机械制造专业研究生开设“机器智能控制”学位课程，并编写了研究生教材，本书是在这一基础上根据技术发展和讲授效果，作了补充和订正而编写的。

本书第一~七，第九~十三章由张伯鹏编写；第八章由黄亭亭编写。徐家球、吴怡多年从事本课程的讲授，对本书的编写提供了不少宝贵的意见。限于篇幅本书未能录入原教材中有关人机智能控制系统的章节，有兴趣的读者可参阅有关著作。全书由机械电子工业部北京机床研究所顾瑞龙教授级高级工程师担任主审。

本书试图对一个新兴的发展中学科，作一初步不完整的阐述，限于作者的业务水平，疏漏或不妥之处在所难免，请读者不吝批评指正。

张伯鹏
1990年10月

306 / 10

目 录

第一章 绪论	1
§ 1-1 复杂机电动力学系统与智能控制	2
§ 1-2 机电智能控制技术	4
§ 1-3 智能机器	6
参考文献	8
第二章 机电智能控制工程基本概念	9
§ 2-1 智能、符号智能和技艺智能	9
§ 2-2 控制、智能控制和智能工程	10
§ 2-3 知识及其获取和表示	12
参考文献	13
第三章 机械技术和机械知识	14
§ 3-1 机械技术	14
§ 3-2 机械知识	16
参考文献	23
第四章 典型机电智能控制系统	24
§ 4-1 车削加工刀具磨损状态的智能监控系统	24
§ 4-2 柔性制造单元中零件调度的智能控制	27
§ 4-3 受控上臂假肢的智能控制	29
§ 4-4 机器人柔顺运动的智能控制	30
§ 4-5 计算机数字控制机器的智能化编程	32
§ 4-6 智能化自动仓库	34
§ 4-7 工业智能控制系统	35
§ 4-8 自导引车辆行驶的智能控制	35
§ 4-9 人机型遥控机器人系统	39
参考文献	43
第五章 事物的描述	44
§ 5-1 事物分类及其赋名描述	44
§ 5-2 事物的性状描述	47
§ 5-3 事物的名词短语描述	48
§ 5-4 事物的动作、状态描述	49
§ 5-5 建立有效的描述	50
§ 5-6 描述的强化和推广	56
参考文献	59
第六章 约束及其利用	60
§ 6-1 问题求解中的约束及其利用	61
§ 6-2 自然语言理解和处理中的约束	62
§ 6-3 智能机器人完成作业时的约束及其利用	62

IV

参考文献	64
第七章 搜索与规划	65
§ 7-1 状态与操作	65
§ 7-2 搜索和冲突调解	67
§ 7-3 求解问题的规划	74
参考文献	75
第八章 机械设计智能工程	76
§ 8-1 机械设计和机械设计自动化	76
§ 8-2 机械设计领域知识	79
§ 8-3 机械设计专家系统	82
参考文献	93
第九章 工艺设计智能工程	94
§ 9-1 工艺设计	94
§ 9-2 关于 CAPP	96
§ 9-3 零件的描述	97
§ 9-4 工艺知识表示和工艺知识库的建造	110
§ 9-5 工艺设计的推理决策	115
参考文献	117
第十章 装配智能工程	118
§ 10-1 装配作业的目标	118
§ 10-2 主要装配关系	119
§ 10-3 主要装配动作	119
§ 10-4 装配作业的实施	120
§ 10-5 装配是个信息增加过程	121
§ 10-6 人工装配的特点	122
§ 10-7 一些零部件拆卸装配基本规则	123
§ 10-8 产品零件的约束与可拆卸判别	124
§ 10-9 零件的拆卸动作和几何可拆卸性	128
§ 10-10 装配状态的实时感知	129
参考文献	135
第十一章 夹具建造智能工程	136
§ 11-1 传统夹具的主要功能	136
§ 11-2 工件的定位、夹紧规则	137
§ 11-3 受控适应型夹具	140
参考文献	143
第十二章 质量保障智能工程	144
§ 12-1 加工过程监控的必要性	144
§ 12-2 专家监控方式	145
§ 12-3 柔性制造系统中的质量保障机能	145
§ 12-4 刀具极度磨损和破损的智能化监控	147
§ 12-5 智能化视觉监控	151

§ 12-6 软件创成精度	153
§ 12-7 智能化工件几何精度检验方法及步骤的产生	165
§ 12-8 设备的故障诊断和维修	166
参考文献	167
第十三章 智能机器的几个机构学问题	168
§ 13-1 智能机器的无源机构	168
§ 13-2 智能机器的有源机构	171
§ 13-3 智能机器的空间运动执行部分	173
参考文献	181

第一章 绪 论

机电智能控制工程主要阐述有关机电工业自动化和智能活动自动化相结合的基础理论和技术。

控制工程是自动化技术的理论基础，控制工程方法的特点是对受控部分的定量模型按控制要求及算法，在数据空间内进行解算并在此基础上实现控制。

机电智能控制工程研究机电动力学系统的智能控制和智能工程问题。

智能是脑的属性，它至少含两个范畴，即可用符号表示及处理的符号智能，以及表现为技师所掌握的各种操作技艺的技艺智能。前一个范畴已经成为人工智能研究的主要目标，后一个范畴的研究则尚处于起步阶段。

所以，智能控制至少也可以分为符号智能控制和技艺智能控制。符号智能控制的特点是在不断完善的知识库和数据库的支持下，对主要由语义型描述及定量描述表征的受控复杂机电动力学系统，在符号处理水平上进行推理、决策并实现控制。

技艺智能控制的目标则是要把技师的熟练、复杂的感知、决策和行动序列，用技术系统加以复现。由于技艺知识和技艺智能难以用符号表示或语言描述，为了实现技艺智能控制，还有一系列基本问题有待解决。近期内，把人和机电系统通过人机交互结合起来，可能是实现技艺智能控制的现实可行途径。

研究开发机电智能控制基础理论和技术的目的：

- (1) 发展各种实用、先进的智能机器、智能机构和智能工程技术；
- (2) 在由人和机器组成的人机系统中，发挥人的智能优势，优化分配人和机器之间的功能，改善人机交互，提高人机系统的效能；
- (3) 学习机电智能控制用之有效的各种知识，提高人的工作能力。

从18世纪第一次产业革命开始，在相当长的一段历史时期内，设计和制造各种机器的主要目的是在工业生产中作为劳动工具减轻或替代人的繁重体力劳动。机器作为人手的延伸极大地改变了人类改造自然的进程。

本世纪上半叶兴起的以大量生产方式、科学管理和各种自动化技术的应用为特征的技术革命，使工业化国家的生产力得到了迅速发展。

近30年来，由于计算机科学技术和其他新技术的进展，各种配置有不同程度人工智能的计算机系统、感受器和灵巧效应器的机器人已经开始从实验室走进工厂，部分取代了原来由人完成的一些体力劳动和脑力劳动。各种知识处理系统，各种智能化仪器、智能机器和智能生产系统以及各种智能工程技术正在日新月异地涌现出来，并在实际应用中发挥愈来愈重要的作用。

新一代的智能机器的基本特点是机器将不仅包括动力源、传动、执行、构件和控制等部分，即不只是人手的延伸，而且它还是人的感官和脑的延伸，即还包括感受和智能控制部分。知识将不仅是设计、生产机器所必需的，机器还将具有接受、存贮、处理、发送甚至产生知识的能力。

多少年来人们一直希望能创造有智能的机器，但只是在科学技术发展到今日的水平，智能机器的实现才成为可能。

智能活动自动化的理论基础是人工智能，它的诞生可以追溯到本世纪30年代 Turing 有关智力机器的探讨^[5]。到50年代计算机科学技术发展到一定水平后，才开始了对人工智能的认真研究。1962年王浩提出的算法证明了《数学原理》全书的定理，被认为是用计算机实现智力活动的开端。同一时期还出现了使计算机能通过学习和人对奕的启发式程序（1962）、归纳人在解题过程中的思维规律而编制的“通用解题程序”（1960）以及人工智能用的LISP语言（1960）等。进入70年代，有关人工智能及其应用的研究十分活跃，1978年智能控制作为一个学科被提出^[1]，1980年清华大学在国内首次为机械制造专业的研究生开设出《机器智能控制》课程^{[12][14]}。文献^{[10][11]}是这一时期国内有关智能控制的部分论述。

知识工程是人工智能研究的一个重要领域，把知识的表示和处理提高到工程技术的高度是人工智能研究的成就之一。知识可以用形式化的符号或语言等表示，知识工程是研究知识的有效表示，归纳各种专家分析、解决问题的经验，研究知识的处理、供需规律、知识的产生和传递，以及知识的有效使用、学习等。

迄今人们已经能够把各种结构严密的知识，如数学、物质结构、基因拼结以及逻辑推理等内容设计为程序，赋给计算机。但是对那些结构不严密的即复杂的、不确定的、模糊的知识，如经验、常识、直觉和自然语义等，若要把它们形式化设计为计算机程序，还要做很多工作。至于技艺知识，迄今还没有找到它的表示或描述方法。

大量的领域知识，包括公有知识和经验知识经过形式化表示，并编排存贮起来供查询取用，就成为知识库。在知识库支持下经过推理为用户提供咨询或指导的软件系统就是一个专家系统。建造专家系统首先要进行知识获取及其表示。目前计算机获取知识的过程是很繁琐的，要通过知识工程师采集专家们的知识，再表示成为计算机可以接受的软件。由于专家系统的有效性很大程度上取决于所要处理问题的领域内可供使用的专门知识的深度、广度和时间性，因此有效的专家系统，其知识库总是庞大的、时变的、高质量的。其次是知识的编排，获取的知识要去粗存精、分类编排，以一定数据结构置入计算机内存。知识编排的基本要求是针对问题便于提取。知识处理就是知识库支持下的推理决策。此外，还有知识评估问题，包括知识的先验评估和事后的评估，以及根据评估修改知识库和推理机等。

人工智能与控制理论是机电智能控制的科学基础。计算机系统和技术、各种感受监测技术、工程控制技术和机电一体化技术则是机电智能控制的技术基础。

§ 1-1 复杂机电动力学系统与智能控制

机电智能控制所面对的是复杂机电动力学系统。作为受控部分的复杂机电动力学系统，其主要特征是：

(1) 系统具有众多的状态和状态变量，各个状态和状态变量之间存在丰富的联系，这种联系可以是控制联系也可以是信息联系；

(2) 系统难以用定量模型作完整的描述。

考虑到输入量、输出量、作业环境及人机交互等因素，生产过程、制造系统、生产车间、工厂以及在复杂环境中完成目标作业的智能机器人等，都可以看作是复杂动力学系统。

图 1-1 是一个简化了的工厂组成功能单元框图。可以看出不仅组成工厂的功能单元（图中各矩形框）众多，各个功能单元的状态和状态变量的数目也较大，各个功能单元之间还具有丰富的联系（未全画出）。上述状态和联系中不少内容如产品外观评估、人员素质评估、产品工艺设计方法等都难以作定量描述。

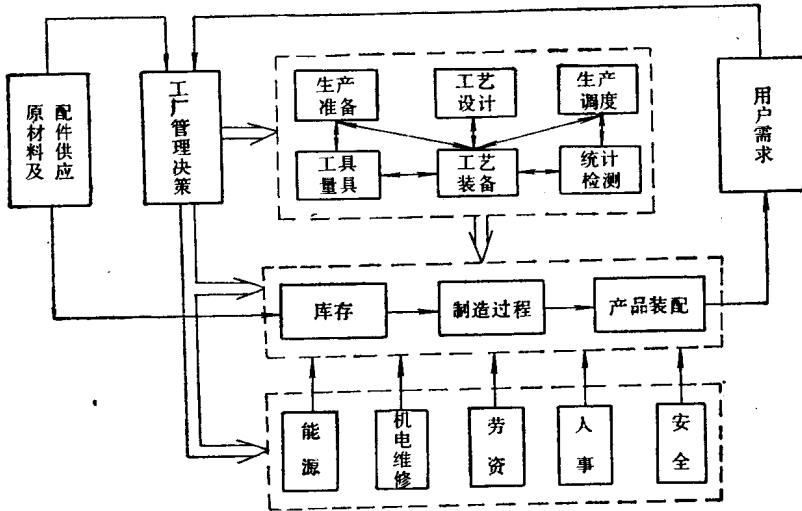


图1-1 简化了的工厂功能框图

用控制工程方法实现复杂机电动力学系统的控制常是困难的，这首先是由系统的复杂性造成解算途径的指数爆炸特性引起的，使得在有限的时间内用解析方法求得解答几乎成为不可能。另一个困难则是由于依照系统的非定量型描述难以建立系统的定量模型，难以在数据空间内进行解算。

考察人所面对的各种复杂动力学系统和人对复杂动力学系统所实施的有效控制，其基本特点是人所实施的控制是经过思考的，是知识支持下的控制，是有智能的控制即智能控制。可以期望智能控制也是实现复杂机电动力学系统控制的有效途径。

符号智能控制是在不断完善的知识库支持下，在符号处理水平上进行推理决策，再经过知识信息转换产生的控制。是经过“深思熟虑”而产生的控制。

符号智能控制产生的基本特点是：

- (1) 它是知识支持下产生的控制；
- (2) 在符号智能控制系统中存在知识/信息（知信）及信息/知识（信知）间的转换，也就是存在符号/数据及数据/符号间的转换，为了实施智能控制需要符号/数据转换，为了感知被控状态需要数据/符号转换；

(3) 它的产生要有个过程，即调用知识进行推理决策及知信、信知变换的过程，完成这一过程需要时间，所以迄今多数符号智能控制都是非实时的。

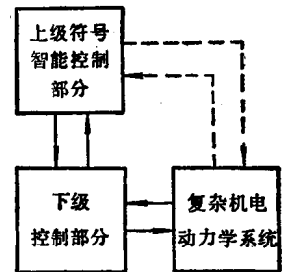


图1-2 符号智能控制系统

上述特点使得实现复杂机电动力学系统符号智能控制的合理方案是分层次的，即上级符号智能控制部分控制下级控制部分，而由下级控制部分实施复杂动力学系统的实时控制，必

要时上级符号智能控制部分也可以直接干与复杂机电动力学系统。整个符号智能控制系统的框图如图1-2。

§ 1-2 机电智能控制技术

机电智能控制技术是工业自动化技术和智能、技艺活动自动化技术相结合的产物。机电智能控制技术是建造智能机器和智能机构、研究开发智能工程技术以及改善人机系统的技术基础。

一、建造智能机器

建造智能机器可能是机电智能控制技术最主要的应用。智能机器大致由三部分组成，即受控部分、下级控制部分和上级符号智能控制部分，示意如图1-3。其中上级符号智能控制部分通过人机交互和用户交联，受控部分则和环境交联。

建造智能机器需要解决的主要技术关键有：

(1) 受控部分作为受控复杂机电动力学系统，其状态与过程常难以用定量模型进行描述，需要研究受控复杂机电动力学系统的事实描述和过程描述。

(2) 为建造上级符号智能控制部分的知识库和推理机，需要充分采集、归纳专家的经验知识并将其形式化、结构化，还要解决知识库和推理机的自学习问题。

(3) 智能控制的实施，在符号处理水平上的推理决策和定量的控制是不同的，二者之间通过知信或信知转换相关联。

符号智能控制可以通过封闭的知识、信息流完成，即为闭环符号智能控制，它包括以下环节：

- * 推理、决策；
- * 评估受控状态，或达到要求，或继续实施符号智能控制；
- * 选择控制矢量，规划控制步骤；
- * 实施定量控制；
- * 感知受控状态；
- * 识别受控状态。

图1-4是闭环符号智能控制的框图，图中单线箭头表示信息流，双线箭头表示知识流。

符号智能控制也可以通过不封闭的知识、信息流完成，即为开环符号智能控制，它的框图如图1-5所示。

(4) 受控状态的感知、识别，其功能是定量地感知受控状态矢量，信号经过预处理完成识别并转换成知识反馈到智能控制部分。

建造智能机器主要是完成三方面的工作即：

(1) 建造符号智能控制及控制部分。这部分是智能机器的中枢，具有以下特点：

- * 具有层次构造；
- * 存在知识流及信息流，且二者互相转换；

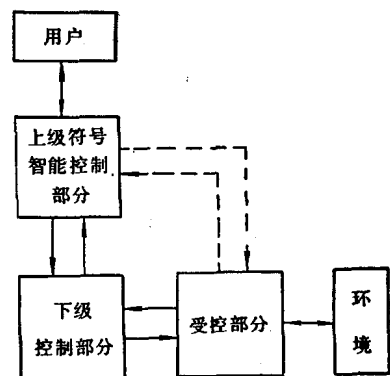


图1-3 智能机器的组成

- * 同时存在串行及并行知识、信息处理；
- * 不同语言及不同功能模块间有大量的通讯及接口；
- * 语言及编程技术有待发展；
- * 有效的容错处理，包括差错的及时发现及其局部化处理、差错原因的诊断及差错的消除等。

(2) 建造感知部分。可以利用各种物理、化学性质建造几何的、物理的感受器，其中最有应用潜力的是光视感受器及广义力感受器。

在制造工业中，光视感受器可用于：

- * 工件尺寸检测；
- * 几何位姿检测、运动监视；
- * 几何形状检测（刀具识别、工件识别）；
- * 表面粗糙度、织地检测；
- * 工艺状态监测；
- * 加工设备状态监测；
- * 环境监视；
- * 人机交互。

光视图象识别的技术关键是图象信号的快速采集、处理和识别算法的研究以及主动识别技术的研究。

(3) 建造执行部分。智能机器的执行部分应具有分布智能、可编程功能及灵巧的运作能力，包括：

- * 灵巧的操作部分，其典型是可用于搬运、装配、完成各种工艺作业，甚至可作为感受装置的灵巧手（含腕），有感受能力的灵巧手是近年国内外重点研究开发的目标之一；
- * 灵巧的移动部分，其典型是可有效作平面移动及跨越障碍移动的轮、腿复合全方位移动装置；
- * 受控的工艺作业执行部分。

二、建造智能机构

机构是组成机器的运动单元。迄今机构都由具有确定相对运动的构件组成，而构件则是由零件组成的刚性结构。

低等动物常具有分布式的神经网络，其特点是具有分布式控制，各控制及受控部分相对独立，局部损伤不致影响整个机体的运作。按照这一特点，也有可能把智能机器中的一部分符号智能控制解体为分布式的，即把受控机构和感知及符号智能控制部分组合在一起，方案框图如图 1-6 所示。

智能机构的构造是机电一体化的、有源的。智能机构把符号智能控制分布到机构部分，赋给机构以一定的自治能力，有利于提高智能机器的性能及其运作可靠性。

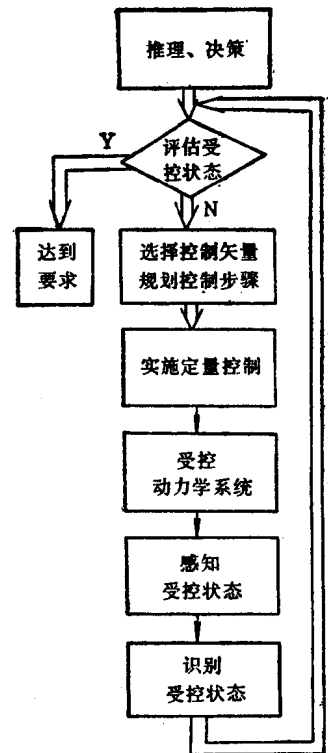


图1-4 闭环符号智能控制框图

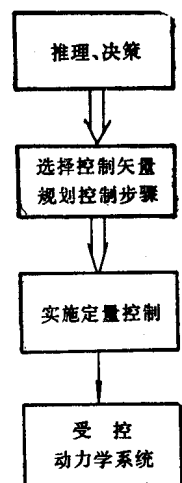


图1-5 开环符号智能控制框图

三、开发智能工程技术

在机电工程技术领域迫切需要开发的智能工程技术很多，下面列举几项已经起步的项目。

(1) 机电设计智能工程：即把专家系统和CAD结合起来，共享设计经验，开发各种设计专家系统，提高机电设计水平。

(2) 工艺设计智能工程：迄今工艺设计主要靠工艺师的经验，为了共享工艺设计经验，提高工艺设计水平，需要开发各种工艺设计专家系统，这一工作国外已作了十几年，国内还处于起步阶段。由于机械制造工艺的复杂性和经验性，这个领域还有很多工作要做。

(3) 生产调度智能工程。和工艺设计类似，迄今生产调度主要靠调度员的经验，由于工业生产的复杂性，这种主要靠人的生产调度往往效率不高，为此需要开发针对具体产品及生产条件的生产调度专家系统。

(4) 感受智能工程：大量的感受信号在知识支持下及时进行智能化的预处理，即感知融合。感知融合是建造分布式智能机器的关键技术之一。

(5) 容错智能工程：复杂动力学系统的智能控制部分和控制部分在运作过程中出现差错是不可避免的，重要的是在差错发生之前采取措施（如强迫更换器件等），或是及时发现差错并作出恰当处理保证系统正常运作。所有这些都需知识的支持。这是改善复杂动力学系统运作可靠性的关键技术之一。

(6) 知识信息和信息知识转换技术：研究怎样把非定量描述的经验知识转换为有效的定量信息及相反的转变。这一转换可以通过开环或闭环方式完成，迄今人们对这一转换的了解还不多。

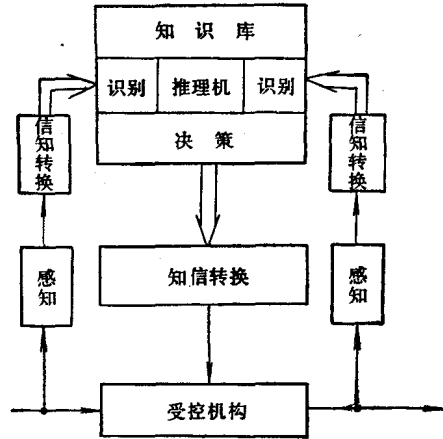


图1-6 智能机构框图

§ 1-3 智能机器

从应用角度看，智能机器大致有四类。

(1) 知信型智能机器：这是目前研究开发得最多的一类智能机器，组成它的主体是各种专家系统软件。主要功能包括数据和知识的采集、转换、建造知识库、通讯、推理、决策、自学习和人机交互等，目的是根据需要提供咨询诊断或决策。

节律训练系统是这种类型机器中较简单的一种，用来使学员尽快掌握要求的动作节律。首先通过感受器采集优秀运动员或操作者的标准动作节律时间序列信号，经过专家系统处理如根据经验适当扩大相邻动作时间间隔，训练时使被训练者从学习较慢节律开始，逐渐升级到标准动作节律为止。实践证明这样作比一开始就学习标准节律更为有效。

专用的咨询或诊断专家系统是较上例复杂的知信型智能机器。机组故障诊断系统，某些疾病的诊断系统，大型设备的启动、维护咨询系统等都属此类。这类系统的软件大多可以布置在小型或微型计算机上，通过人机对话获取咨询或诊断结果，并在应用过程中不断改进系

统的知识库和推理方式。

管理专家系统是较复杂的知信型智能机器，它帮助管理者作出最佳决策。一般说来信息资料越全面、准确、及时则质量越好，依此作出的决策质量就越高。以一个企业来说，管理信息至少应包括销售、供应、人事、财会、生产、检验以及技术等方面的信息。管理专家系统的特点之一是各种原始知识和数据要经过预处理以提高质量，且企业组织中任何一个部门的知识和数据都可以为其他部门共用，即知信资源共享。

知信型智能机器还包括用来完成自然语言理解和翻译、定理证明、博弈等软件系统。

(2) 作业型智能机器：大多数工业智能机器都属于这一类，典型的例子是智能机器人，智能假肢和智能移动机器人等。

作业型智能机器能在复杂时变的工作条件下，相对自治地完成给定的任务。

智能机器人具有智能控制部分以及光视、力、触、声等感知部分。和工业机器人相比较，智能机器人具有更多的仿人功能。

智能假肢能识别语音或语言信号并产生目标受控运动，对于多自由度假肢用智能控制比用生物电控制可能更为可靠。

智能移动机器人包括具有自导引能力的轮行机器人、履带行机器人、步行机器人等。智能移动机器人的主要特点是在运动过程中能根据环境状态感知，作出推理决策并产生相应的响应如回避障碍、避免翻倒等。由于智能移动机器人不断运动，运动能量的提供成了一个关键，目前还只能做到通过导线提供电能或是自携电池。需要开发高效能源和高效换能技术。像动物那样在常温常压下产生化学能并通过肌肉转换为机械能，目前在智能移动机器人上还难以做到。

(3) 监控型智能机器：监控型智能机器的主要功能是监测复杂动力学系统的被控状态，在知识库支持下作出推理决策并产生响应或控制作用。它一般由感知部分和智能控制两部分组成。

以现代电站为例，不仅要监测运行工况，还要进行效益核算及管理。60年代的电站，维持正常运行要监测温度、压力、流量、液位、各种电参数、各种机械量、各种物理化学成分等几百个参量，进入80年代一个现代化电站需要监测的参量竟达上万个，而且要求全面地实现自动化运行和优化管理。不难看出，这种任务仅靠操作者的经验和能力是难以实现的，必须采用监控型智能机器。

在现代化的生产过程中，监控的重要性已经得到公认，面对各种庞大而复杂的监控任务，监控型智能机器提供了一个有效和解决问题的途径。

(4) 人机系统：多年来国内、外对人机系统从生理和行为的角度进行了不少研究，但是事实上人作为操作者的根本优势是具有智能，因此改善人机系统工作性能的重要途径是在操作者生理和行为研究的基础上充分发挥操作者的智能优势，并在这一基础上优化分配操作者和机器的功能。

在我国促进人机系统研究的主要原因有两个。首先是由于各种现代化的人机系统构造日趋复杂，运行工况不断强化，如高运动速度、高跟踪精度等，要求在复杂的工作条件下实现优化运行，要提高可靠性，要节能等等。所有这些都提高了对人机系统中人的要求，需要仔细研究人机系统中人的智能、生理和行为特点。其次还由于在当前和今后相当长的历史时期内，在我国国民经济各个领域中都存在大量有人操作的机器，我国人口众多，具有智能方面

的优势。把这一优势引向改进各种人机系统，即充分发挥操作者的智能优势，把人和机器最优地结合起来，将是我国四化建设中具有普遍意义的重要课题。

参 考 文 献

- 1 Vamos T. Automatic Control and Artificial Intelligence. Finland; 7th IFAC, 1978, V4, 2355-2369
- 2 Nitzan D. Machine Intelligence Research to Industrial Automation. West Lafayette; 6th NSF Grantee's Conf., Sept. 1978
- 3 Nitzan D. Machine Intelligence Research to Industrial Automation. Cornell University; 7th NSF Grantee's Conf., Sept. 1979
- 4 Rosen C A. Machine Intelligence Research Applied to Industrial Automation. Draper Lab. MIT; 5th NSF Grantee's Conf., Sept. 1977
- 5 Turing A M. On Computable Numbers with an Application to the Entscheidungsproblem. Proc. London Math. Soc., 1936-7, S. 2, V42, 230-265
- 6 Winston P H. Artificial Intelligence. Addison-Wesley, 1977
- 7 Nilsson Nils J. Principle of Artificial Intelligence. Tioga Pub. Co., 1980
- 8 Shannon C E, ed. Automata Studies. Princeton University Press, 1956
- 9 Gevarter W B. Intelligent Machines. Prentice-Hall, 1985
- 10 张伯鹏. 机器智能控制和软件创成精度. 北京; 第二届机床设计与研究年会全会报告, 1980
- 11 蒋新松. 人工智能及智能控制系统概述. 中国自动化学会第三次全会, 1980
- 12 张伯鹏. 机器智能控制基础. 上、下册. 清华大学精密仪器系研究生教材, 1982
- 13 张伯鹏, 徐家球. 机器智能控制基础教学实验指示书. 一、二、三、四. 清华大学精密仪器系, 1982
- 14 张伯鹏, 徐家球. 机器智能控制基础课程在机械专业的开设. 上海; 中国自动化学会第三届模式识别与机器智能学术会议, 1983, 4
- 15 张伯鹏. 人机智能控制系统. 清华大学精密仪器系研究生教材, 1983

第二章 机电智能控制工程基本概念

机电智能控制工程着重阐述怎样用自动化了的智能产生有效的控制和智能工程问题。

智能控制工程作为一门学科诞生至今还不过十余年，有关这一学科的基本概念和研究范畴还在不断发展。

本章将阐述和机电智能控制工程有关的一些基本概念。

§ 2-1 智能、符号智能和技艺智能

智能是脑的属性，是物质运动的高级形式。智能是人在认识和改造环境过程中，运用知识解决问题的各种能力的总和。认识环境的能力包含感知融合、环境状态的特征抽取和模式识别、外部环境的内部表示即环境建模等。改造环境的能力则包含问题求解、搜索、学习和自主学习、行动规划及实施等。智能活动是在记忆、推理、学习和联想等功能支持下完成的。智能活动既包括有目的的获取知识的能力，也包括有目的的处理和应用知识的能力。但是迄今有关脑的智能，人们还了解得很少，现在还没有公认的有关智能的定义。

从工程技术角度看，智能至少包含两个范畴即符号智能和技艺智能。可以用符号表示及处理的那部分知识称为符号知识。符号智能含知识的符号表示和在符号知识支持下物理符号系统上获取有限合理结果的符号处理。

技艺智能是行动中的智能，是人在技艺知识支持下通过示教学习建立起来的感知、动作集合。技艺智能系统的特点是：

- (1) 具有丰富的感知；
- (2) 具有灵巧的受控执行部分；
- (3) 在智能支持下，(1)、(2)之间存在连通模式可变的、连通权重受控的丰富的交联。

技艺知识和技艺智能不仅难以作定量的描述，用语义也无法确切描述，就是说技艺知识和技艺智能不能用符号表示和处理。雕刻技艺、音乐演奏技巧、各种专业操作技巧等作为技艺知识和智能都具有上述特点。生活中的游泳、滑冰、骑自行车、驾驶机动车辆等作为技艺知识和技能也具有上述特点。

技艺知识和智能只靠言传、文传是学不会的，必须通过动作的示教、学习、再示教、再学习，使学习者的感知、动作模式和示教者的感知，动作模式不断匹配，并按照匹配差异调整学习者的感知、动作模式，直至达到一定的符合程度为止，才能掌握技艺知识和智能。

比较符号智能和技艺智能可以看到：

- (1) 符号智能和技艺智能都属于智能的范畴；
- (2) 符号智能活动一般是非实时的，技艺智能活动则常是实时的；
- (3) 符号智能活动虽然难以作定量描述，但常可作语义型描述。技艺智能活动不仅难以作定量描述，亦难以作语义描述，只能通过感知动作序列示教加以描述。

形式上智能 I 可以表示为

$$I \Rightarrow \sum_i R_i + \sum_j T_j + \sum_k C_k \quad (2-1)$$

式中 R_i ($i = 1, 2, 3, \dots$) ——可用符号表示及处理的某种认识环境的能力;
 T_j ($j = 1, 2, 3, \dots$) ——可用符号表示及处理的某种改造环境的能力;
 C_k ($k = 1, 2, 3, \dots$) ——某种难以用符号表示及处理的认识和改造环境的能力, 即某种技艺。

从控制及工程实现的角度探讨符号智能和技艺智能活动的特点及其自动化方法, 是建造各种智能机器和智能工程的重要基础。

§ 2-2 控制、智能控制和智能工程

在控制工程中约束是个重要的基本概念, 各种物理的、化学的、数学的规律都是某种约束。约束的基本特点是它的存在使受控动力学系统的状态变异域小于不存在约束时的状态变异域。

约束不是控制, 含有信息的约束才是控制, 即

$$\text{约束} + \text{信息} \Rightarrow \text{控制} \quad (2-2)$$

在控制作用下, 受控动力学系统以熵量表征的不确定性将减小。

控制可以用信息含量作定量的描述, 也可以用算法表征。

智能控制是知识支持下产生的控制, 是含有知识的控制, 即

$$\text{控制} + \text{知识} \Rightarrow \text{智能控制} \quad (2-3)$$

上式中的知识至少由两部分组成, 即

$$\text{符号知识} + \text{技艺知识} \Rightarrow \text{知识} \quad (2-4)$$

上式中的符号知识虽然包括了经验知识和公有知识, 但主要指的是经验知识。

从行为角度看智能控制和控制都是对受控系统施加有信息的约束, 但是控制可以用信息作定量的描述, 而智能控制则难以用知识作定量的描述, 因为知识本身迄今尚没有公认的量化定义。

由于知识和控制属于两个不同的范畴, 在符号处理水平上推理决策得到的知识要经过知识、信息转换才能产生控制, 如图2-1所示。量化的信息也需要通过信息、知识转换成为知识, 才能反馈到上级智能控制部分中去, 如图2-2所示。

§ 1-1指出智能控制系统常具有分层次的构造, 考虑到知识和信息之间的转换, 系统的典型框图如图2-3所示。

从智能控制系统中知识与信息的流向看, 智能控制可以由闭环方式实现, 其构造示意如图2-4所示。图2-3也是闭环智能控制。人工装配、机器人装配、人驾驶汽车, 无人驾驶汽车等都属闭环智能控制。

智能控制也可以由开环方式实现, 其构造示意如图2-5所示。

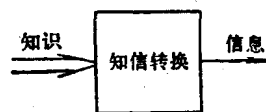


图2-1 知识、信息转换



图2-2 信息、知识转换

知信转换和信知转换都是转换环节，作用是把一个范畴内的集合或变量映射到另一个范畴内的变量或集合上去，即把知识和信息联接起来。这种转换并不是某种标准化的转换，而是按不同条件根据经验知识和公有知识确定的不变或可变的转换，例如知信转换可为

略为加大 $\Rightarrow +2\%$ (加大范围 $\pm 80\%$)。

轻轻下推 \Rightarrow 以 0.5N 力下推 (推力范围 $0 \sim 100\text{N}$)。

略为向前移动 \Rightarrow 沿 x 轴向移动 0.1mm (向前移动范围 $0 \sim 100\text{mm}$)。

信知转换的例子为

电平大于 10mV (电平变化范围 $0 \sim 12\text{mV}$) \Rightarrow 电平偏高。

转速小于 10r/min (转速范围 $0 \sim 1000\text{r/min}$) \Rightarrow 低速运行。

噪声小于 60dB (噪声范围 $55 \sim 80\text{dB}$) \Rightarrow 噪声较低，运行正常。

可以从以下几个方面比较控制和智能控制系统。

(1) 受控部分不同，环境也不同。控制系统的受控部分一般具有有限个受控变量，控制和环境都可以作定量描述，控制还可以用算法表征。

智能控制系统的受控部分是复杂动力学系统，环境也是变化着的复杂环境，受控部分和环境的描述以语义型的描述为主而难以作全定量描述。

(2) 产生控制的途径不同。控制是依照受控部分和环境的定量描述按给定的算法在数据空间内产生的。智能控制则是依照受控复杂动力学系统和复杂环境的非定量描述，在不断完善的知识库支持下，于符号处理水平上经过推理、决策及知信转换在数据空间内产生的。控制和智能控制虽然都产生在数据空间内，但二者产生的途径则是完全不同的。

(3) 作业目标不同。控制的作业目标一般是尽可能减少环境的影响，使受控部分的状态变量能和目标变量时刻保持基本一致，例如液位高度控制、目标跟踪控制等，控制的作业目标总的来说是具体的、局部的。智能控制的作业目标是全局的、宏观的。例如智能控制制造系统的作业目标是最经济地如期按质一次制造成功。智能控制自治型移动机器人的作业目标是回避障碍以最优路径趋近目标，智能控制机器人装配的作业目标是优化装配过程和保障最优装配质量等。

智能工程是指以智能的应用，主要是以符号智能的应用为主体的工程技术项目。

国内、外迄今已取得较多成果的智能工程有：

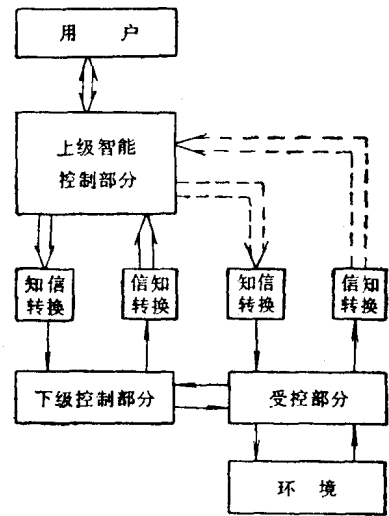


图2-3 智能控制系统框图

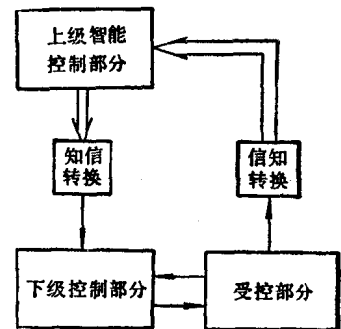


图2-4 闭环智能控制

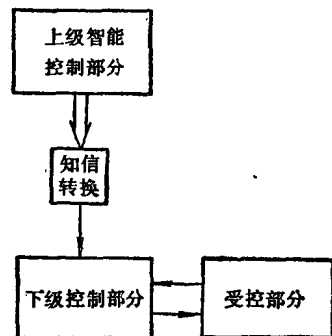


图2-5 开环智能控制