



第 3 章

专家控制

专家系统是第一个获得广泛应用的人工智能系统。20 世纪 70 年代中期,专家系统的开发获得成功。正如专家系统的先驱费根鲍姆(Feigenbaum)所说:专家系统的力量是从它处理的知识中产生的,而不是从某种形式主义及其使用的参考模式中产生的。这正符合一句名言:知识就是力量。到 20 世纪 80 年代,专家系统在全世界得到迅速发展和广泛应用。现在,专家系统并不过时,而是不断更新,被称为“21 世纪知识管理和决策的技术”。

专家控制系统是一个应用专家系统技术的控制系统,也是一个典型的和广泛应用的基于知识的控制系统。海斯·罗思(Hayes-Roth)等在 1983 年提出专家控制系统。他们指出,专家控制系统的全部行为能被自适应地支配;为此,该控制系统必须能够重复解释当前状况,预测未来行为,诊断出现问题的原因,制订校正规划,并监控规划的执行,确保成功。关于专家控制系统应用的第一次报道是在 1984 年,它是一个用于炼油的分布式实时过程控制系统。奥斯特洛姆(Åström)等在 1986 年发表题为“专家控制”(Expert Control)的论文。从此之后,更多的专家控制系统获得开发与应用。

本章主要讨论如下 5 个问题,即专家系统的基本原理、专家系统的主要类型及其结构、专家控制系统的结构与类型以及专家控制系统的应用实例等。下面我们将逐一对它们加以介绍。

3.1 专家系统的基本概念

自从 1965 年第一个专家系统 DENDRAL 在美国斯坦福大学问世以来, 经过 20 年的研究开发, 到 20 世纪 80 年代中期, 各种专家系统已遍布各个专业领域, 取得很大的成功。现在, 专家系统得到更为广泛的应用, 并在应用开发中得到进一步发展。

3.1.1 专家系统的定义与一般结构

1. 专家系统的定义

定义 3.1 专家系统 专家系统是一个智能计算机程序系统, 其内部含有大量的某个领域专家水平的知识与经验, 能够利用人类专家的知识解决问题的方法来处理该领域问题, 以人类专家的水平完成特别困难的某一专业领域的任务。简而言之, 专家系统是一种模拟人类专家解决领域问题的计算机程序系统。

定义 3.2 基于知识的专家系统 专家系统是广泛应用专门知识以解决人类专家水平问题的人工智能的一个分支。专家系统有时又称为基于知识的系统或基于知识的专家系统。

2. 专家系统的一般结构

专家系统的结构是指专家系统各组成部分的构造方法和组织形式。系统结构选择恰当与否是与专家系统的适用性和有效性密切相关的。选择什么结构最为恰当, 要根据系统的应用环境和所执行任务的特点而定。

图 3.1 表示专家系统的简化结构图。图 3.2 则为理想专家系统的结构图。由于每个专家系统所需要完成的任务和特点不相同, 其系统结构也不尽相同, 一般只具有图中的部分模块。

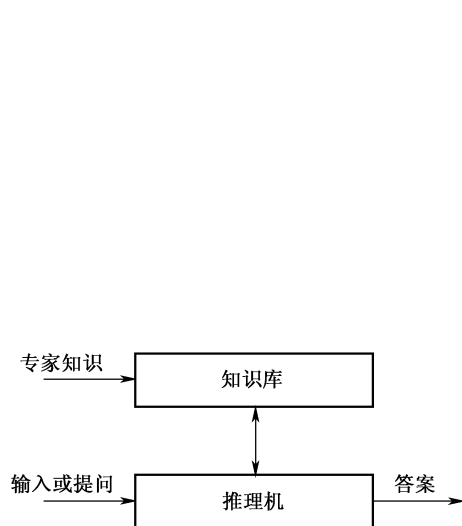


图 3.1 专家系统简化结构图

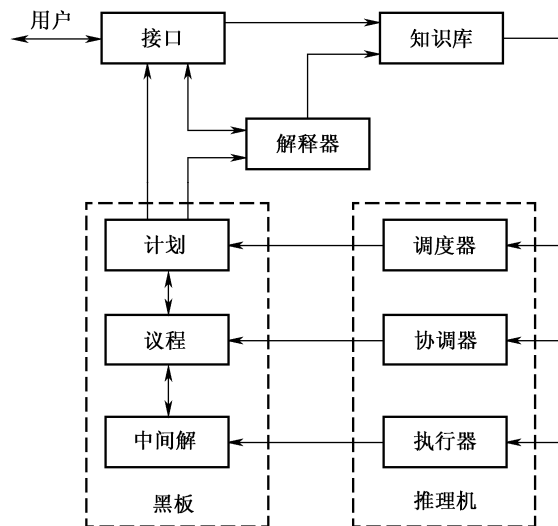


图 3.2 理想专家系统结构图

接口是人与系统进行信息交流的媒介, 它为用户提供了直观方便的交互作用手段。接口的功能是识别与解释用户向系统提供的命令、问题和数据等信息, 并把这些信息转化为系统的内部表示形式。另一方面, 接口也将系统向用户提出的问题、得出的结果和作出的解释以用户易于理解的形式

提供给用户。

黑板是用来记录系统推理过程中用到的控制信息、中间假设和中间结果的数据库。它包括计划、议程和中间解三部分。计划记录了当前问题总的处理计划、目标、问题的当前状态和问题背景。议程记录了一些待执行的动作，这些动作大多是由黑板中已有结果与知识库中的规则作用而得到的。中间解区域中存放当前系统已产生的结果和候选假设。

知识库包括两部分内容。一部分是已知的同当前问题有关的数据信息；另一部分是进行推理时要用到的一般知识和领域知识。这些知识大多以规则、网络和过程等形式表示。

调度器按照系统建造者所给的控制知识（通常使用优先权办法），从议程中选择一个项作为系统下一步要执行的动作。执行器应用知识库及黑板中记录的信息，执行调度器所选定的动作。协调器的主要作用就是当得到新数据或新假设时，对已得到的结果进行修正，以保持结果前后的一致性。

解释器的功能是向用户解释系统的行为，包括解释结论的正确性及系统输出其他候选解的原因。为完成这一功能，通常需要利用黑板中记录的中间结果、中间假设和知识库中的知识。

专家系统程序与常规的应用程序之间有何不同呢？一般应用程序与专家系统的区别在于：前者把问题求解的知识隐含地编入程序，而后者则把其应用领域的问题求解知识单独组成一个实体，即为知识库。知识库的处理是通过与知识库分开的控制策略进行的。更明确地说，一般应用程序把知识组织为两级——数据级和程序级；大多数专家系统则将知识组织成三级——数据、知识库和控制。

在数据级上，是已经解决了的特定问题的说明性知识以及需要求解问题的有关事件的当前状态。在知识库级，是专家系统的专门知识与经验。是否拥有大量知识是专家系统成功与否的关键，因而知识表示就成为设计专家系统的关键。在控制程序级，根据既定的控制策略和所求解问题的性质来决定应用知识库中的哪些知识。这里的控制策略是指推理方式，按照是否需要概率信息来决定采用非精确推理或精确推理。推理方式还取决于所需搜索的程度。

下面把专家系统的主要组成部分归纳于下。

(1) 知识库 (knowledge base)。知识库用于存储某领域专家系统的专门知识，包括事实、可进行操作与规则等。为了建立知识库，要解决知识获取和知识表示问题。知识获取涉及知识工程师 (knowledge engineer) 如何从专家那里获得专门知识的问题；知识表示则要解决如何用计算机能够理解的形式表达和存储知识的问题。

(2) 综合数据库 (global database)。综合数据库又称全局数据库或总数据库，它用于存储领域或问题的初始数据和推理过程中得到的中间数据 (信息)，即被处理对象的一些当前事实。

(3) 推理机 (reasoning machine)。推理机用于记忆所采用的规则和控制策略的程序，使整个专家系统能够以逻辑方式协调地工作。推理机能够根据知识进行推理和导出结论，而不是简单地搜索现成的答案。

(4) 解释器 (explainer)。解释器能够向用户解释专家系统的行为，包括解释推理结论的正确性以及系统输出其他候选解的原因。

(5) 接口 (interface)。接口又称界面，它能够使系统与用户进行对话，使用户能够输入必要的的数据、提出问题 and 了解推理过程及推理结果等。系统则通过接口，要求用户回答提问，并回答用户提出的问题，进行必要的解释。

3.1.2 专家系统的建造步骤

成功地建立系统的关键在于尽可能早地着手建立系统，从一个比较小的系统开始，逐步扩充为

一个具有相当规模和日臻完善的试验系统。

建立系统的一般步骤如下：

(1) 设计初始知识库。知识库的设计是建立专家系统最重要和最艰巨的任务。初始知识库的设计包括：

1) 问题知识化，即辨别所研究问题的实质，如要解决的任务是什么，它是如何定义的，可否把它分解为子问题或子任务，包含哪些典型数据等。

2) 知识概念化，即概括知识表示所需要的关键概念及其关系，如数据类型、已知条件（状态）和目标（状态）、提出的假设以及控制策略等。

3) 概念形式化，即确定用来组织知识的数据结构形式，应用人工智能中各种知识表示方法与概念化过程有关的关键概念、子问题及信息流特性等变换为比较正式的表达，包括假设空间、过程模型和数据特性等。

4) 形式规则化，即编制规则、把形式化了的的知识变换为由编程语言表示的可供计算机执行的语句和程序。

5) 规则合法化，即确认规则化了的知识的合理性，检验规则的有效性。

(2) 原型机（prototype）的开发与试验。在选定知识表达方法之后，即可着手建立整个系统所需要的试验子集，它包括整个模型的典型知识，而且只涉及与试验有关的足够简单的任务和推理过程。

(3) 知识库的改进与归纳。反复对知识库及推理规则进行改进试验，归纳出更完善的结果。经过相当长时间（例如数月或两三年）的努力，使系统在一定范围内达到人类专家的水平。

这种设计与建立步骤如图 3.3 所示。

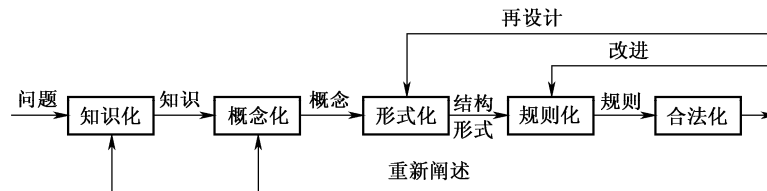


图 3.3 建立专家系统的步骤

3.2 专家系统的主要类型及其结构

本节将根据专家系统的工作机理，逐一讨论基于规则的专家系统、基于框架的专家系统和基于模型的专家系统（可分别简称为规则专家系统、框架专家系统和模型专家系统）的工作机理及结构。

3.2.1 基于规则的专家系统

1. 基于规则专家系统的工作模型

产生式系统的思想比较简单，却十分有效。产生式系统是专家系统的基础，专家系统就是从产生式系统发展而成的。基于规则的专家系统是个计算机程序，该程序使用一套包含在知识库内的规则对工作存储器内的具体问题信息（事实）进行处理，通过推理机推断出新的信息。其工作模型如图 3.4 所示。

系统已向面向目标的设计发展，但是基于规则的专家系统仍然继续发挥重要的作用。基于规则的专家系统具有许多优点和不足之处，在设计开发专家系统时，使开发工具与求解问题匹配是十分重要的。

3.2.2 基于框架的专家系统

框架是一种结构化表示方法，它由若干个描述相关事物各方面及其概念的槽构成，每个槽拥有若干侧面，每个侧面又可拥有若干个值。

1. 面向目标编程与基于框架设计

基于框架的专家系统就是建立在框架的基础之上的。一般概念存放在框架内，而该概念的一些特例则表示在其他框架内并含有实际的特征值。基于框架的专家系统采用了面向目标编程技术，以提高系统的能力和灵活性。现在，基于框架的设计和面向目标的编程共享许多特征，导致在应用“目标”和“框架”这两个术语时往往引起某些混淆。

面向目标编程涉及其所有数据结构均以目标形式出现。每个目标含有两种基本信息，即描述目标的信息和说明目标能够做些什么的信息。应用专家系统的术语来说，每个目标具有陈述知识和过程知识。面向目标编程为表示实际世界目标提供了一种自然的方法。我们观察的世界一般都是由物体组成的，如小车、鲜花和蜜蜂等。

在设计基于框架系统时，专家系统的设计者们把目标称为框架。现在，从事专家系统开发研究和应用者，已交替使用这两个术语而不产生混淆。

2. 基于框架专家系统的结构

与基于规则的专家系统的定义类似，基于框架的专家系统是个计算机程序，该程序使用一组包含在知识库内的框架对工作存储器内的具体问题信息进行处理，通过推理机推断出新的信息。这里采用框架而不是采用规则来表示知识。框架提供一种比规则更丰富的获取问题知识的方法，不仅提供某些目标的包描述，而且还规定该目标如何工作。

为了说明设计和表示框架中的某些知识值，可以考虑图 3.6 所示的人类框架结构。图中，每个圆看作面向目标系统中的一个目标，而在基于框架系统中看作一个框架。用基于框架系统的术语来说，存在孩子对父母的特征，以表示框架间的自然关系。例如约翰是父辈“男人”的孩子，而“男人”又是“人类”的孩子。

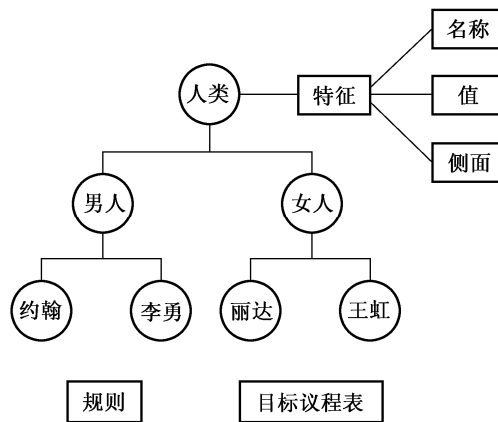


图 3.6 人类的框架分层结构

图 3.6 中,最顶部的框架表示“人类”这个抽象的概念,通常称之为类(class)。附于这个类框架的是“特征”,有时称为槽(slots),是一个这类物体一般属性的表列。附于该类的所有一下层框架将继承所有特征。每个特征有它的名称和值,还可能有一组侧面,以提供更进一步的特征信息。一个侧面可用于规定对特征的约束,或者用于执行获取特征值的过程,或者在特征值改变时做些什么。

图 3.6 的中层是两个表示“男人”和“女人”这种不太抽象概念的框架,它们自然地附属于其前辈框架“人类”。这两个框架也是类框架,但附属于其上层类框架,所以称为子类(subclass)。底层的框架附属于其适当的中层框架,表示具体的物体,通常称为例子(instances),它们是其前辈框架的具体事物或例子。

这些术语,类、子类和例子(物体)用于表示对基于框架系统的组织。从图 3.6 中还可以看到,某些基于框架的专家系统还采用一个目标议程表(goal agenda)和一套规则。该议程表仅提供要执行的任务表列。规则集合则包括强有力的模式匹配规则,它能够通过搜索所有框架寻找支持信息,从整个框架世界进行推理。

更详细地说,“人类”这个类的名称为“人类”,其子类为“男人”和“女人”,其特征有年龄、国籍、居住地、期望寿命等。子类和例子也有相似的特征。这些特征都可以用框架表示。

3.2.3 基于模型的专家系统

1. 基于模型专家系统的提出

对人工智能的研究内容有着各种不同的看法。有一种观点认为:人工智能是对各种定性模型(物理的、感知的、认识的和社会的系统模型)的获得、表达及使用的计算方法进行研究的学问。根据这一观点,一个知识系统中的知识库是由各种模型综合而成的,而这些模型又往往是定性的模型。由于模型的建立与知识密切相关,所以有关模型的获取、表达及使用自然地包括了知识获取、知识表达和知识使用。所说的模型概括了定性的物理模型和心理模型等。以这样的观点来看待专家系统的设计,可以认为一个专家系统是由一些原理与运行方式不同的模型综合而成的。

采用各种定性模型来设计专家系统,其优点是显而易见的。一方面,它增加了系统的功能,提高了性能指标;另一方面,可独立地深入研究各种模型及其相关问题,把获得的结果用于改进系统设计。专家系统开发工具 PESS (Purity Expert System) 利用四种模型,即基于逻辑的心理模型、神经网络模型、定性物理模型以及可视知识模型。这四种模型不是孤立的,PESS 支持用户将这些模型进行综合使用。基于这些观点,已完成了以神经网络为基础的核反应堆故障诊断专家系统及中医医疗诊断专家系统,为克服专家系统中知识获取这一瓶颈问题提供一种解决途径。定性物理模型则提供了对深层知识及推理的描述功能,从而提高了系统的问题求解与解释能力。至于可视知识模型,既可有效地利用视觉知识,又可在系统中利用图形来表达人类知识,并完成人机交互任务。

前面讨论过的基于规则的专家系统和基于框架的专家系统都是以逻辑心理模型为基础的,是采用规则逻辑或框架逻辑,并以逻辑作为描述启发式知识的工具而建立的计算机程序系统。综合各种模型的专家系统无论在知识表示、知识获取还是知识应用上都比那些基于逻辑心理模型的系统具有更强的功能,从而有可能显著改进专家系统的设计。

在诸多模型中,人工神经网络模型的应用最为广泛。早在 1988 年,就有人把神经网络应用于专家系统,使传统的专家系统得到发展。

2. 基于神经网络的专家系统

神经网络模型从知识表示、推理机制到控制方式，都与目前专家系统中的基于逻辑的心理模型有本质的区别。知识从显式表示变为隐式表示，这种知识不是通过人的加工转换成规则，而是通过学习算法自动获取的。推理机制从检索和验证过程变为网络上隐含模式对输入的竞争。这种竞争是并行的和针对特定特征的，并把特定论域输入模式中的各个抽象概念转化为神经网络的输入数据，以及根据论域特点适当地解释神经网络的输出数据。

如何将神经网络模型与基于逻辑的心理模型相结合是值得进一步研究的课题。从人类求解问题来看，知识存储与低层信息处理是并行分布的，而高层信息处理则是顺序的。演绎与归纳是不可少的逻辑推理，两者结合起来能够更好地表现人类的智能行为。从综合两种模型的专家系统的设计来看，知识库由一些知识元构成，知识元可为一个神经网络模块，也可以是一组规则或框架的逻辑模块。只要对神经网络的输入转换规则和输出解释规则给予形式化表达，使之与外界接口及系统所用的知识表达结构相似，则传统的推理机制和调度机制都可以直接应用到专家系统中去，神经网络与传统专家系统集成，协同工作，优势互补。根据侧重点不同，其集成有三种模式：

(1) 神经网络支持专家系统。以传统的专家系统为主，以神经网络的有关技术为辅。例如对专家提供的知识和案例，通过神经网络自动获取知识。又如运用神经网络的并行推理技术以提高推理效率。

(2) 专家系统支持神经网络。以神经网络的有关技术为核心，建立相应领域的专家系统，采用专家系统的相关技术完成解释等方面的工作。

(3) 协同式的神经网络专家系统。针对大的复杂问题将其分解为若干子问题，针对每个子问题的特点选择用神经网络或专家系统加以实现，在神经网络和专家系统之间建立一种耦合关系。

图 3.7 表示一种神经网络专家系统的基本结构。其中，自动获取模块输入、组织并存储专家提供的学习实例、选定神经网络的结构、调用神经网络的学习算法，为知识库实现知识获取。当新的学习实例输入后，知识获取模块通过对新实例的学习，自动获得新的网络权值分布，从而更新了知识库。

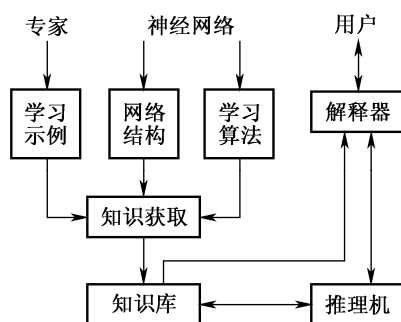


图 3.7 神经网络专家系统的基本结构

下面讨论神经网络专家系统的几个问题。

(1) 神经网络的知识表示是一种隐式表示，是把某个问题领域的若干知识彼此关联地表示在一个神经网络中。对于组合式专家系统，同时采用知识的显式表示和隐式表示。

(2) 神经网络通过实例学习实现知识自动获取。领域专家提供学习实例及其期望解，神经网络学习算法不断修改网络的权值分布。经过学习纠错而达到稳定权值分布的神经网络，就是神经网络

络专家系统的知识库。

(3) 神经网络的推理是一个正向非线性数值计算过程,同时也是一种并行推理机制。由于神经网络各输出节点的输出是数值,因而需要一个解释器对输出模式进行解释。

(4) 一个神经网络专家系统可用加权有向图表示,或用邻接权矩阵表示,因此,可把同一知识领域的几个独立的专家系统组合成更大的神经网络专家系统,只要把各个子系统间有连接关系的节点连接起来即可。组合神经网络专家系统能够提供更多的学习实例,经过学习训练能够获得更可靠更丰富的知识库。与此相反,若把几个基于规则的专家系统组合成更大的专家系统,由于各知识库中的规则是各自确定的,因而组合知识库中的规则冗余度和不一致性都较大;也就是说,各子系统的规则越多,组合的大系统知识库越不可靠。

3.3 专家控制系统的结构与类型

定义 3.3 专家控制系统 应用专家系统的概念和技术,模拟人类专家的控制知识与经验而建造的控制系统,称为专家控制系统。

专家系统与专家控制系统之间有一些重要的差别:

(1) 专家系统只对专门领域的问题完成咨询作用,协助用户进行工作。专家系统的推理是以知识为基础的,其推理结果为知识项、新知识项或对原知识项的变更知识项。然而,专家控制系统需要独立和自动地对控制作用做出决策,其推理结果可为变更的知识项,或为启动(执行)某些解析算法。

(2) 专家系统通常以离线方式工作,而专家控制系统需要获取在线动态信息,并对系统进行实时控制。实时要求遇到下列一些难题:非单调推理、异步事件、基于时间的推理以及其他实时问题。

源于自动控制领域的专家控制被视为求解控制问题的新示例,而且在过去十多年中在各种领域进行许多开发与应用。工作在不同领域和具有不同专业背景的人们已对专家控制系统表现出巨大热情和兴趣。

本节首先提出专家控制系统的控制要求和设计原则,然后介绍专家控制系统的结构与类型,最后讨论与说明专家控制器的实例。

3.3.1 专家控制系统的控制要求与设计原则

至今为止的自适应控制存在两个显著缺点,即要求具有准确的装置模型以及不能为自适应机理设定有意义的目标。专家控制器不存在这些缺点,因为它避开了装置的数学模型,并为自适应设计提供有意义的时域目标。

1. 专家控制系统的控制要求

一般说来,对专家控制系统没有统一的和固定的要求,这种要求是由具体应用决定的。不过,可以对专家控制系统提出一些综合要求:

(1) 运行可靠性高。要求专家控制器具有较高的运行可靠性,它通常具有方便的监控能力。

(2) 决策能力强。大多数专家控制系统具有不同水平的决策能力。专家控制系统能够处理不确定性、不完全性和不精确性之类的问题,这些问题难以用常规控制方法解决。

(3) 应用通用性好。包括易于开发、示例多样性、便于混合知识表示、全局数据库的活动维

数、基本硬件的机动性、多种推理机制（如假想推理、非单调推理和近似推理）以及开放式的可扩充结构等。

（4）控制与处理的灵活性。包括控制策略的灵活性、数据管理的灵活性、经验表示的灵活性、解释说明的灵活性、模式匹配的灵活性以及过程连接的灵活性等。

（5）拟人能力。专家控制系统的控制水平必须达到人类专家的水准。

专家控制系统的控制要求是根据应用情况指定的。例如，有一个过程控制，对其专家控制器的具体要求与下列情况有关：连续操作，对不同工作档采用多重专家操作，输入材料质量的不相容性，随时间逐渐改变的过程，非常复杂的装置结构，多传感器，对不同的控制任务采用适当的与不同的装置描述级别，以及装置的模型可能具有不同的形式等。

2. 专家控制器的设计原则

根据上述讨论，可以进一步提出专家控制器的设计原则如下：

（1）模型描述的多样性。在设计过程中，对被控对象和控制器的模型应采用多样化的描述形式，不应拘泥于单纯的解析模型。现有的控制理论对控制系统的设计都唯一依赖于受控对象的数学解析模型。在专家式控制器的设计中，由于采用了专家系统技术，能够处理各种定性的与定量的、精确的与模糊的信息，因而允许对模型采用多种形式的描述。这些描述形式主要有：

1）解析模型。主要表达方式有：微分方程、差分方程、传递函数、状态空间表达式和脉冲传递函数等。

2）离散事件模型。用于离散系统，并在复杂系统的设计和分析方面找到更多的应用。

3）模糊模型。在不知道对象的准确数学模型而只掌握了受控过程的一些定性知识时，用模糊数学的方法建立系统的输入和输出模糊集以及它们之间的模糊关系则较为方便。

4）规则模型。产生式规则的基本形式为：

$$\text{IF (条件) THEN (操作或结论)} \quad (3.1)$$

这种基于规则的符号化模型特别适于描述过程的因果关系和非解析的映射关系等。它具有较强的灵活性，可方便地对规则加以补充或修改。

5）基于模型的模型。对于基于模型的专家系统，其知识库含有不同的模型，其中包括物理模型和心理模型（如神经网络模型和视觉知识模型等），而且通常是定性模型。这种方法能够通过离线预计算来减少在线计算，产生简化模型使之与所执行的任务逐一匹配。

此外，还可根据不同情况采用其他类型的描述方式。例如，用谓词逻辑来建立系统的因果模型，用符号矩阵来建立系统的联想记忆模型等。

总之，在专家式控制器的设计过程中，应根据不同情况选择一种或几种恰当的描述方式，以求更好地反映过程特性，增强系统的信息处理能力。

专家式控制器的一般模型可用如下形式表示：

$$U = f(E, K, I, G) \quad (3.2)$$

其中， f 为智能算子，其基本形式为：

$$\text{IF } E \text{ AND } K \text{ THEN (IF } I \text{ THEN } U) \quad (3.3)$$

式中 $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$ 为控制器输入集；

$K = \{k_1, k_2, \dots, k_n\}$ 为知识库中的经验数据与事实集；

$I = \{i_1, i_2, \dots, i_p\}$ 为推理机构的输出集；

$U = \{u_1, u_2, \dots, u_q\}$ 为控制器输出集。

智能算子的基本含义是：根据输入信息 E 和知识库中的经验数据 K 与规则进行推理，然后根据推理结果 I ，输出相应的控制行为 U 。智能算子的具体实现方式可采用前面介绍的各种方式（包括解析型和非解析型）。图 3.8 中给出这些参量的位置。

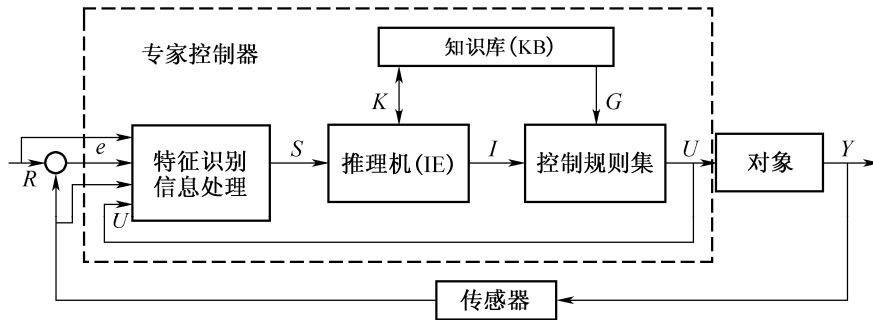


图 3.8 工业专家控制器简化结构图

(2) 在线处理的灵巧性。智能控制系统的重要特征之一就是能够以有用的方式来划分和构造信息。在设计专家式控制器时应十分注意对过程在线信息的处理与利用。在信息存储方面，应对做出控制决策有意义的特征信息进行记忆，对于过时的信息则应加以遗忘；在信息处理方面，应把数值计算与符号运算结合起来；在信息利用方面，应对各种反映过程特性的特征信息加以抽取和利用，不要仅限于误差和误差的一阶导数。灵活地处理与利用在线信息将提高系统的信息处理能力和决策水平。

(3) 控制策略的灵活性。控制策略的灵活性是设计专家式控制器所应遵循的一条重要原则。工业对象本身的时变性与不确定性以及现场干扰的随机性，要求控制器采用不同形式的开环与闭环控制策略，并能通过在线获取的信息灵活地修改控制策略或控制参数，以保证获得优良的控制品质。此外，专家式控制器中还应设计异常情况处理的适应性策略，以增强系统的应变能力。

(4) 决策机构的递阶性。人的神经系统是由大脑、小脑、脑干、脊髓组成的一个递阶决策系统。以仿智为核心的智能控制，其控制器的设计必然要体现递阶原则，即根据智能水平的不同层次构成分级递阶的决策机构。

(5) 推理与决策的实时性。对于设计用于工业过程的专家式控制器，这一原则必不可少。这就要求知识库的规模不宜过大，推理机构应尽可能简单，以满足工业过程的实时性要求。

由于专家式控制器在模型的描述上采用多种形式，就必然导致其实现方法的多样性。虽然构造专家式控制器的具体方法各不相同，但归纳起来，其实现方法可分为两类：一类是保留控制专家系统的结构特征，但其知识库的规模小，推理机构简单；另一类是以某种控制算法（例如 PID 算法）为基础，引入专家系统技术，以提高原控制器的决策水平。专家式控制器虽然功能不如专家控制系统完善，但结构较简单，研制周期短，实时性好，具有广阔的应用前景。

3.3.2 专家控制系统的结构

图 3.9 给出专家控制系统的原理图。从图 3.9 可见，以专家控制器取代传统控制，如反馈控制系统中的 PID 控制器，即可构成专家控制系统。而如同专家系统一样，知识库和推理机是专家控制器的核心组成部分。

错误!

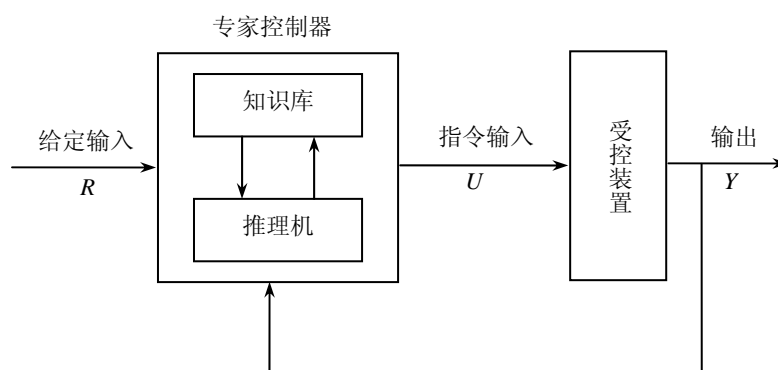


图 3.9 专家控制系统原理图

专家控制系统随着应用场合和控制要求的不同，其结构也可能不一样。然而，几乎所有的专家控制系统（控制器）都包含知识库、推理机、控制规则集和/或控制算法等。

图 3.10 画出专家控制器的基本结构。从性能指标的观点看，专家控制系统应当为控制目标提供同师傅或专家操作时得到的一样或十分相似的性能指标。

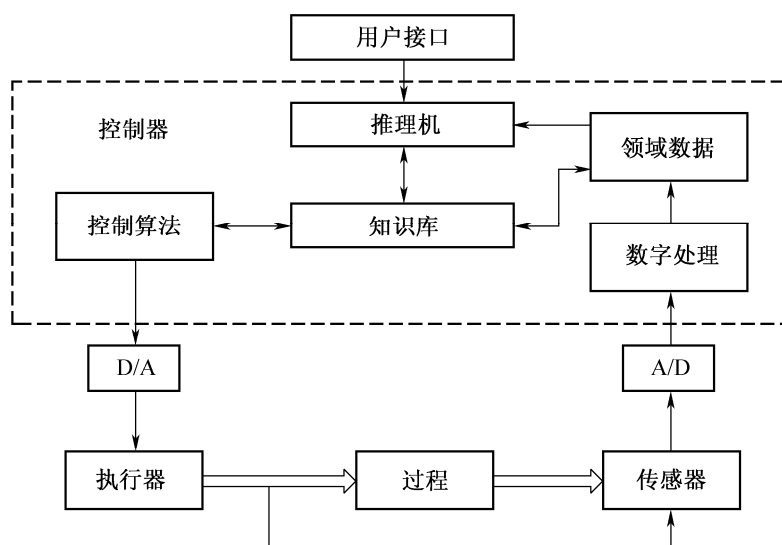


图 3.10 专家控制器的典型结构

下面讨论两种专家控制器的具体结构。

1. 工业专家控制器

专家控制器（EC）的基础是知识库（KB），KB 存放工业过程控制的领域知识，由经验数据库（DB）和学习与适应装置（LA）组成。经验数据库主要存储经验和事实。学习与适应装置的功能就是根据在线获取的信息补充或修改知识库内容，改进系统性能，以便提高问题求解能力。图 3.11 给出一种工业专家控制器的框图。

建立知识库的主要问题是表达已获取的知识。EC 的知识库用产生式规则来建立，这种表达方式具有较高的灵活性，每条产生式规则都可独立地增删、修改，使知识库的内容便于更新。

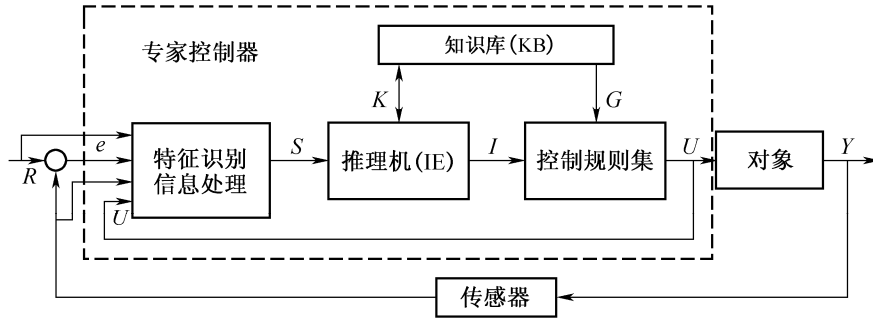


图 3.11 工业专家控制器简化结构图

控制规则集 (CRS) 是对受控过程的各种控制模式和经验的归纳和总结。由于规则条数不多，搜索空间很小，推理机 (IE) 就十分简单，采用向前推理方法逐次判别各种规则的条件，满足则执行，否则继续搜索。

特征识别与信息处理 (FR&IP) 部分的作用是实现对信息的提取与加工，为控制决策和学习适应提供依据。它主要包括抽取动态过程的特征信息，识别系统的特征状态，并对这些特征信息进行必要的加工。

专家控制器的输入集为：

$$E=(R, e, Y, U) \tag{3.4}$$

$$e=R-Y \tag{3.5}$$

式中： R 为参考控制输入； e 为误差信号； Y 为受控输出； U 为控制器的输出集。

I 、 G 、 U 、 K 和 E 之间的关系已由式 (3.2) 表示，即：

$$U=f(E, K, I, G)$$

其中，智能算子 f 为几个算子的复合运算：

$$f=g \cdot h \cdot p \tag{3.6}$$

其中， g 、 h 、 p 也是智能算子，而且有：

$$\left. \begin{aligned} g: E &\rightarrow S \\ h: S \times K &\rightarrow I \\ p: I \times G &\rightarrow U \end{aligned} \right\} \tag{3.7}$$

式中： S 为特征信息输出集； G 为规则修改指令。

这些算子具有下列形式：

$$\text{IF } A \quad \text{THEN } B \tag{3.8}$$

式中： A 为前提或条件； B 为结论。 A 与 B 之间的关系也可以包括解析表达式、模糊关系、因果关系和经验规则等多种形式。 B 还可以是一个规则子集。

2. 黑板专家控制系统

黑板专家控制系统的结构如图 3.12 所示。

黑板结构是一种强功能的专家系统结构和问题求解模型，它能够处理大量不同的、错误的和不完整的知识，以求解问题。基本黑板结构是由一个黑板 (BB)、一套独立的知识源 (KSs) 和一个调度器组成。黑板为一共享数据区；知识源存储各种相关知识；调度器起控制作用。黑板系统提供了一种用于组织知识应用和知识源之间合作的工具。

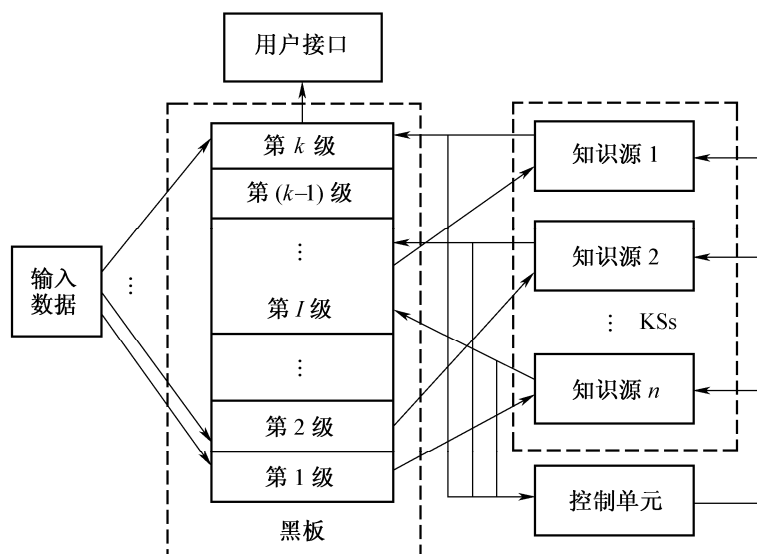


图 3.12 黑板专家控制系统的结构

黑板系统的最大优点在于它能够提供控制的灵活性及综合各种不同的知识表示和推理技术。黑板控制系统由三个部分组成：

(1) 黑板 (BB)。黑板用于存储所有知识源可访问的知识，它的全局数据结构用于组织问题求解数据，并处理各知识源之间的通信问题。放在黑板上的对象可以是输入数据、局部结果、假设、选择方案和最后结果等。各知识源之间的交互作用是通过黑板执行的。一个黑板可被分割为无数个子黑板；也就是说，按照求解问题的不同方面，可把黑板分为几个黑板层，如图 3.12 中的第 1 级至第 k 级。因此，各种对象可被递阶地组织进不同的分析层级。

在黑板上的每一记录条目可有个相关的置信因子。这是系统处理知识不确定性的一种方法。黑板的机理能够保证在每个知识源与已求得的局部解之间存在一个统一的接口。

(2) 知识源 (KSs)。知识源是领域知识的自选模块；每个知识源可视为专门用于处理一定类型的较窄领域信息或知识的独立程序，而且具有决定是否应当把自身信息提供给问题求解过程的能力。黑板系统中的知识源是独立分开的，每个知识源具有自己的工作过程或规则集合和自有的数据结构，包含知识源正确运行所必需的信息。知识源的动作部分执行实际的问题求解，并产生黑板的变化。知识源能够遵循各种不同的知识表示方法和推理机制。因此，知识源的动作部分可为一个含有正向/逆向搜索的产生式规则系统，或者是一个具有填槽过程的基于框架的系统。

(3) 控制器。黑板系统的主要求解机制是由某个知识源向黑板增添新的信息开始的。然后，这一事件触发其他对新送来的信息感兴趣的知識源。接着，对这些被触发的知识源执行某些测试过程，以决定它们是否能够被合法执行。最后，一个被触发了的知识源被选中，执行向黑板增添信息的任务。这个循环不断进行下去。

控制黑板是一个含有控制数据项的数据库，控制器应用这些数据项从一组潜在可执行的知识源中挑选出一个供执行用知识源。高层规划和策略应在程序执行前以最合适问题状况的方式决定和选择。一组控制知识源，能够不断建构规划以达到系统性能；这些规划描述了求解控制问题所需的作用。规划执行后，控制黑板上的信息得以增补或修改。然后，控制器应用任何一个记录在控制黑板上的启发性控制方法来实现控制作用。

黑板的控制结构使得系统能够对那些与当前挑选的中心问题相匹配的知识源给予较高的优先权。这些注意的中心可在控制黑板上变化。因此，该系统能够探索和决定各种问题求解策略，并把注意力集中到最有希望的可能解答上。

自主移动机器人控制对黑板结构所提供的控制灵活性很感兴趣。已经提出一个用于控制移动机器人的专家系统黑板结构，该黑板专家系统已经实现。

3.3.3 专家控制系统的类型

我们曾根据系统结构的复杂性把专家控制系统分为两种形式，即专家控制系统和专家控制器。现在将按照系统的作用机理来讨论专家控制系统的结构类型。

专家控制器有时又称为基于知识控制器。以基于知识控制器在整个系统中的作用为基础，可把专家控制系统分为直接专家控制系统和间接专家控制系统两种。在直接专家控制系统中，控制器向系统提供控制信号，并直接对受控过程产生作用，如图 3.13 (a) 所示。在间接专家控制系统中，控制器间接地对受控过程产生作用，如图 3.13 (b) 所示。间接专家控制系统又可称为监控式专家控制系统或参数自适应控制系统。

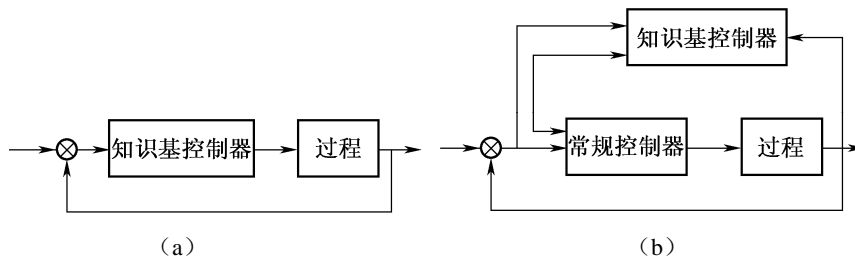


图 3.13 两种专家控制系统

上述两种控制系统的主要区别是在知识的设计目标上。直接专家控制系统的基于知识控制器直接模仿人类专家或人类的认知能力，并为控制器设计两种规则：训练规则和机器规则。训练规则由一系列产生式规则组成，它们把控制误差直接映射为受控对象的作用。机器规则是由积累和学习人类专家/师傅的控制经验得到的动态规则，并用于实现机器的学习过程。在间接专家系统中，智能（基于知识）控制器用于调整常规控制器的参数，监控受控对象的某些特征，如超调、上升时间和稳定时间等，然后拟定校正 PID 参数的规则，以保证控制系统处于稳定的和高质量的运行状态。

3.4 专家控制系统应用举例

近十年来，在过程（流程）工业中开发和应用专家系统的兴趣与日俱增；其中，大部分涉及监控和故障诊断，而且有越来越多的专家系统用于实时过程控制。

3.4.1 实时控制系统的特点与要求

定义 3.4 实时控制系统 如果一个控制系统：①对受控过程表现出预定的足够快的实时行为；②具有严格的响应时间限制而与所用算法无关，那么这种系统称为实时控制系统。

实时系统与非实时系统（如医疗诊断系统）的根本区别在于，实时系统具有与外部环境及时交

互作用的能力。换句话说，实时系统得出结论要比装置（对象、过程）快。如果一个系统在组成部件发生爆炸后 3min 才报告其灾祸即将出现，那就太糟了！某些常见的实时控制系统包括简单的控制器（如家用电器）和监控系统（如报警系统）等。在飞行模拟、导弹制导、机器人控制和工业过程等系统中，已经应用许多比较复杂的实时系统。这些系统都具有一个共性，即当它们与变化的外部环境交互作用时，都受到处理（控制）时间的约束。实时约束意味着专家控制系统应当自动适应受控过程。

专家系统与实时系统在控制上的集成是开发专家系统技术和实时系统技术的一个合乎逻辑的步骤。实时专家控制系统能够在广泛范围内代替或帮助操作人员进行工作。支持开发实时专家控制系统的理由是能够减轻操作者的识别负担，从而提高生产效率。

为了提高实时专家控制系统的执行速度，需要采用特别技术，要实现实时推理与决策。专家控制系统的知识库的规模不应太大，推理机制应尽可能简单，一些关键规则可用较低级语言（如 C 语言或汇编语言）编写，对某些软件包采用调试监督程序。知识库可被分区，使得不同类型的知识能分别由单独的处理器执行处理，这就是已介绍过的黑板技术；每一单独处理器可看作独立专家，各处理器之间通过把各自的推理过程结果置于黑板来实现通信；在黑板上，另一专家系统能够获得与应用这些结果。

实时专家控制系统的具体要求和设计特点如下：

- (1) 准确地表示知识与时间的关系。
- (2) 具有快速和灵敏的上下文激活规则。
- (3) 能够控制任意时变非线性过程。
- (4) 能够进行时序推理、并行推理和非单调推理。
- (5) 修正序列的基本控制知识。
- (6) 具有中断过程和异步事件处理能力。
- (7) 及时获取动态和静态过程信息，以便对控制系统进行实时序列诊断。
- (8) 有效回收不再需要的存储元件，并保持传感器的过程。
- (9) 接受来自操作者的交互指令序列。
- (10) 连接常规控制器和其他应用软件。
- (11) 能够进行多专家系统之间以及专家系统与用户之间的通信。

下面以高炉监控专家系统为例，讨论实时专家控制系统的设计和应用问题。

3.4.2 高炉监控专家系统

1. 高炉控制概况

高炉生产过程的操作是一个十分复杂的过程。铁矿和焦炭从炉顶加入，而鼓风机则由底部吹风。为保证生铁冶炼的质量，高炉安装了几百个传感器，从采集的数据中观察高炉内的状况。现在均采用计算机对炼铁的高炉进行控制和管理。这种管理控制系统往往采用复杂的数学模型，具有以下三个主要的功能，如图 3.14 所示。

(1) 数据分析。分析和采集传感器的数据。

(2) 炉内静态状况分析。当操作约束条件改变很大时，要根据分析结果来寻求最合适的操作方法。

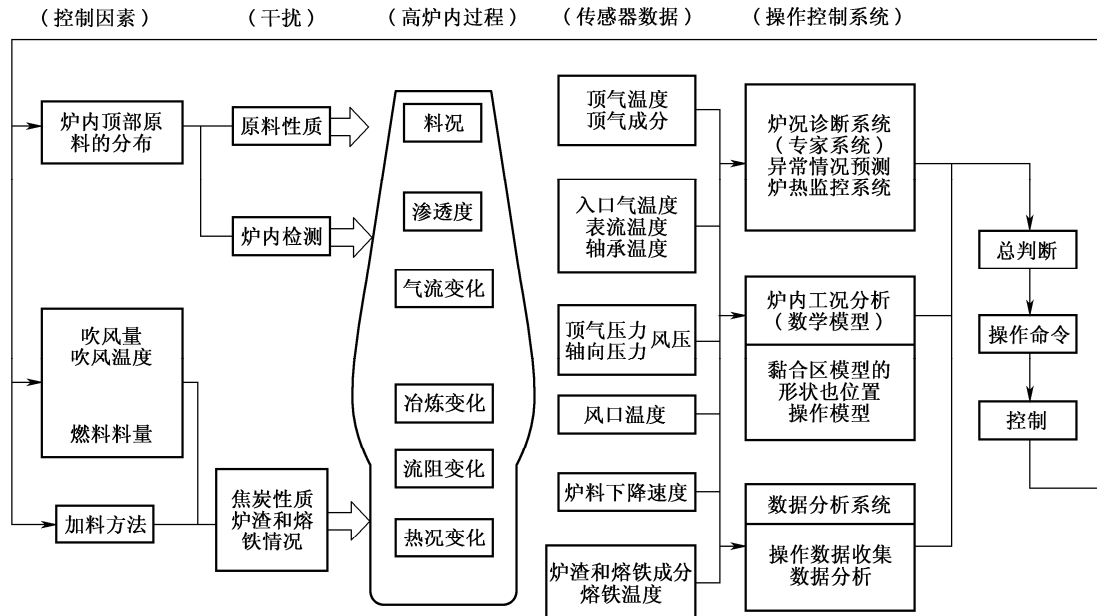


图 3.14 高炉监控的操作及功能

(3) 炉况诊断。控制操作过程基本上是基于传感器数据的采集、分析和过程模型的建立。当炉况比较稳定时，这种操作是比较有效的。但是，当炉内状况非常复杂，发生不正常工况而严重干扰炉子运行时，许多操作还是要依靠有经验操作员或专家的知识 and 经验。因此有必要引入专家系统或智能控制系统来改善高炉运行条件，以提高生铁的质量。

开发和建立专家控制系统对高炉进行控制，其主要目的有三个：

- (1) 利用人工智能技术，建立准确的控制系统。
- (2) 将高炉操作技术标准化和规范化。
- (3) 灵活处理经常性的系统变化要求。

2. 高炉监控专家系统的结构与功能

该监控系统由两部分组成：一是异常炉况预测系统 (AFS)，用于预测炉内炉料滑动和沟道的产生情况；二是高炉熔炼监控系统 (HCS)，用于判断炉内熔炼过程并指导操作员对高炉进行合理的操作。

这是一个观察和控制型的专家系统，能够处理时间序列数据，具有实时性。为了实现这些特性，系统应具有两部分功能，见图 3.15。其一是推理的预处理部分，它用常规的方法在过程计算机上执行。其二是推理部分，它用知识工程技术在 AI (人工智能) 处理器上实现。前者采集传感器的数据，并把它们寄存在时间序列数据库中，经预处理后形成推理所需的事实数据，且显示推理结果。后者利用从前者所产生的事实数据和知识库的规则对高炉的状况进行推理。

3. 监控专家系统开发过程

本专家系统的开发工具基于 LISP 语言，常规算法的开发采用 Fortran 语言。

对于高炉控制与诊断这样具体的专家系统，其开发过程大体如图 3.16 所示。图中各阶段的工作内容说明如下：

- (1) 决定目标：明确系统的功能与所涉及的范围。

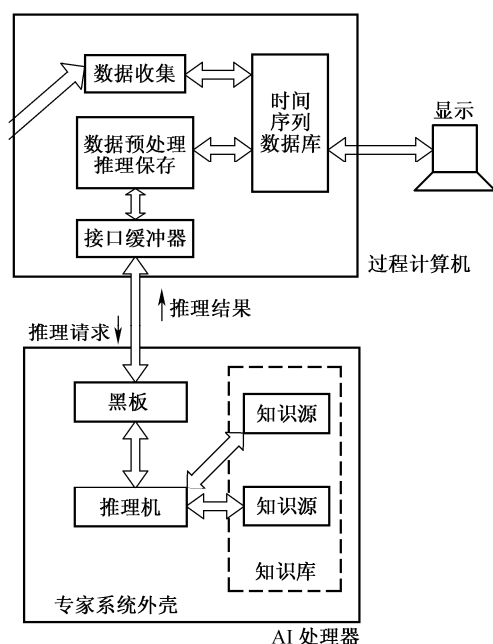


图 3.15 高炉监控专家系统的结构

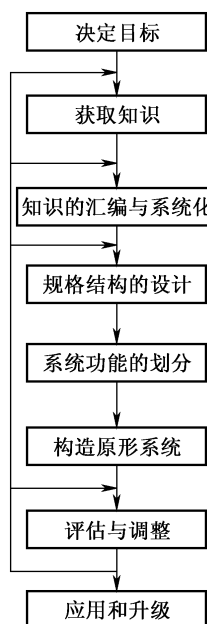


图 3.16 系统开发过程框图

(2) 获取知识：研究有关高炉领域的技术文献资料，研究高炉操作员手册；从领域专家搜集知识。

(3) 知识的汇编与系统化：把专家的思维过程进行归纳整理分类；检查其合理性和存在的矛盾；传感器数据模式整理和分类、数据滤波、分级和求导（差分）；知识模糊性（不确定性）的表示。

(4) 规则结构的设计：将规则分组和结构化，考虑推理的速度。

(5) 系统功能的划分：实现在线实时处理；将系统功能划分为预处理和推理两部分。

(6) 构造原型系统：描述规则和黑板模型；将实际系统和测试系统形式化。

(7) 评估与调整：利用离线测试系统调试系统；检查系统的有效性；调节确定性因子的值。

(8) 应用和升级：增加和校正规则。

上述各个步骤中，知识的获取是关键，它要解决的问题涉及：

(1) 如何表达知识库和规则库中的经验知识的不确定性以便构成高度准确的系统。

(2) 如何获取专家自己意识不到或不很明确的知识（对专家而言这种知识也许是常识性的）。

(3) 利用某些条件，对密集性知识进行分解。

在专家系统开发中必须得到专家（包括操作员和工厂职员）的全力协助。

3.5 小结

本章首先研究了专家系统的基本问题，包括专家系统的定义、类型、结构和建造步骤等。接着在 3.2 节讨论了基于不同技术建立的专家系统，即基于规则的专家系统、基于框架的专家系统和基于模型的专家系统。从这些系统的工作原理和模型可以看出，人工智能的各种技术和方法在专家系统中得到很好的结合和应用。

3.3 节阐述专家控制系统的结构和类型，包括控制要求、设计原则、结构和类型。大多数专家控制器/控制系统具有递阶结构。根据系统的复杂性，可把专家控制系统分为两类，即专家控制器和专家控制系统。专家控制器的应用更为广泛，尤其是在工业过程控制上的应用。按照系统的控制机理，又可把专家控制系统分为直接专家系统和间接专家控制系统两种。前者由控制器直接向受控过程提供控制信号；而后者由控制器间接对受控过程发生作用。

3.4 节举例说明了专家控制系统的应用，即用于控制炼铁高炉温度的实时监控专家系统。通过这个应用例子，读者对专家控制系统的结构、设计方法与实现会有更多和更好的了解。仿真和应用结果已经表明，专家控制系统（控制器）具有优良的性能，并具有广泛的应用领域。

习题 3

- 3-1 什么叫做专家系统？你是如何理解专家系统的？
- 3-2 专家系统由哪些部分构成？各部分的作用是什么？
- 3-3 建造专家系统的关键步骤有哪些？
- 3-4 基于规则的专家系统是如何工作的？其结构是什么？
- 3-5 基于框架的专家系统与面向目标编程有何关系？其结构有何特点？其设计任务是什么？
- 3-6 为什么要提出基于模型的专家系统？试述神经网络专家系统的一般结构。
- 3-7 专家控制的理论基础是什么？
- 3-8 什么叫做专家控制和专家控制系统？
- 3-9 对专家控制系统有哪些要求？它应遵循哪些设计原则？
- 3-10 试给出专家控制系统的一般结构，举例说明专家控制系统的组成和各部分的作用。
- 3-11 专家控制系统有哪几种类型？它们有何区别？
- 3-12 举例说明实时专家控制系统的工作原理及其实现。