

67-67

智能控制

知识计算

人工智能

19

计算机科学 1996 Vol. 23 No. 3

# 智能控制的知识计算理论研究<sup>\*</sup>

鲍立威 黄小强 钱积新

(浙江大学工业控制技术研究所 杭州310027)

0231

TP273

**摘要** In order to overcome the difficulties in the intelligent control of industrial processes, a kind of theory of knowledge computation has been proposed in this paper. Its intents, methodology, its method of representation, and correspondent reasoning mechanism and knowledge acquisition strategy has been presented.

**关键词** Knowledge computation theory, Intelligent control, Industrial processes.

1965年, K. S. Fu 首先把人工智能的启发式推理规则用于学习控制系统, 1971年又提出了以控制理论和人工智能相结合的智能控制的概念。在此基础上, Saridis 提出了以控制理论, 人工智能和运筹学为基础的三元结构<sup>[1]</sup>。李祖愷也提出了以人工智能、控制理论和计算机科学为核心的智能控制理论框架<sup>[2]</sup>。蔡自兴提出了以人工智能、控制理论、运筹学和系统论为内容的四元结构理论模式<sup>[3]</sup>。尽管智能控制尚无明确严格的定义, 还是一个发展和研究中的概念, 但是, 以工程控制论和知识工程的结合, 特别是控制理论与人工智能的结合, 已有了阶段性的成果<sup>[4]</sup>, 并在工业过程控制中有了许多应用<sup>[5]</sup>。

在智能控制研究中, 主要采用了专家系统、模式识别、模糊集理论、信息论原理、人工神经网络等技术和方法。专家系统的基础是人工智能技术, 它在智能控制中的应用, 主要有下列困难悬而未决: 知识表达、知识获取、专家系统的自学习、快速有效的推理机制等等。模式识别是人工智能的另一个重要分支, 模式识别系统关键的问题是特征提取, 是决定模式识别能否成功进行的最重要因素, 但也遇到与人工智能同样的困难<sup>[6]</sup>。模糊集理论的概念自 Zadeh 1965年提出以来, 发展十分迅速<sup>[7]</sup>, 不断得到完善并被广泛应用<sup>[8]</sup>。模糊集理论在智能控制领域的应用中取得了巨大的成功, 然而普遍地遇到一个关键的问题, 即隶属函数的选择问题, 它是模糊集理论的基础, 也是应用中的主要困难。1940年, 香农针对通信工程中信息的测度和传输问题, 提出了以概率分布为基础的形式语法信息测度——信息熵<sup>[9]</sup>, 为信息

理论奠定了基础, 然而由于香农的信息论是抽掉了信息的内容, 抽象了信息的形式而成功提出的, 这正是它应用于智能控制的最大障碍。近年来, 基于混合知识表达的智能控制受到广泛的研究, 但是遇到了一个严重的问题就是异种知识模型之间的交互问题。于是人们开始思考这样一个问题: 智能控制系统中的信息应该如何度量? 信息与控制应该如何结合? 智能控制的核心问题究竟是什么?

## 一、智能控制: 知识计算理论、内容和方法

在界定了工业过程智能控制这样一个论域之后, 我们讨论知识的问题必然联系控制以及被控对象, 如文[10]所指出, 描述过程控制中知识的语言需要具有可计算性, 它包含三个层次的含义: 计算理论、算法和实现机制。在这种意义下, 我们提出的智能控制和知识计算理论的目的是, 为智能控制提供一个理论基础, 使之有一个较大的发展; 它的任务是: 剖析过程控制中知识的可计算性及其本质特征, 建立它的计算理论; 分析人作为一个环节在控制系统中的作用, 建立机器学习的机制; 研究一种满足工业过程控制所需的可计算性要求的语言, 实现机器学习或知识的扩张; 研究实现上述目标的算法和实现机制, 并对可实现性给出分析和论证。我们进行上述研究所使用的方法是: 抓住描述过程及控制的语言的可计算性, 建立从过程控制的知识空间到实空间的映射关系, 利用实空间中的点集和其上的函数以及建立于其上的代数结构和代数结构的扩张来描述过程和控制中的知识、基于知识的推理和知识的

<sup>\*</sup> 本文的研究得到国家八·五攻关项目的资助

获取即学习。

## 二、关于知识的表达

在文[10]中,通过对工业过程控制本质特性的剖析,提出工业过程控制的知识是可以计算的,即可以纳入时空坐标系(被赋予控制体的时空坐标系)。如果将一个控制系统分为控制体和被控对象,借用认知科学中“表象”的概念,则控制体关于被控对象的知识可称为它关于被控对象的表象集合,那么知识的表达就是表象集合借助于实空间的表达。控制体中关于被控对象的性质,即关于被控对象的表象集合可表述为下列三个集合依某种运算的扩张:(1)关于状态的表象集,它由一些特殊的状态构成,并被分别加了标记,不妨记之为  $I_m = \{s_i; s_i \in S, i = \overline{1, m}\}$ , 然后  $I_m$  扩张为  $I_n$ ,  $I_n$  是由以  $I_m$  中元为代表元的类构成的集合,其类的划分关系为:  $R_a = \{R_a \sim (s, a); \|s - a\| < \epsilon_i, \epsilon_i > 0, s_i \in I_m, a \in S\}$  其中  $S$  为控制系统在实空间中的状态域,  $S \subset R^n$ 。这样就形成控制体关于被控对象的状态的表象集,集中每个概念都有它具体的核心即  $s_i$ , 也有它的外延即代表元所属的类,记之为  $O(s_i, \epsilon_i) = \{a; a \cdot R_a \sim s_i, a \in S\}$ , 所以  $I_n = \{O(s_i, \epsilon_i), i = \overline{1, n}\}$ ; (2)关于输入作用的表象集  $I_m$ , 它先由点集  $\{u_i, u_i \in UR^m, i = \overline{1, m}\}$  构成,  $U$  是控制系统的作用域,当  $U$  在时间轴上展开时,分别为在不同时刻加给被控对象的控制作用,对  $I_m$  做同上的扩张成为  $I_n = \{O(u_i, \epsilon_n), i = \overline{1, m}\}$ , 这样形成了控制体关于输入作用的表象集; (3)控制体关于因果关系的表象集  $I_c$ , 被控对象的输入与响应之间的因果关系可以用时空坐标系上的函数来描述,记之为  $f(\cdot)$ , 描述动态过程的  $f(\cdot)$  是一个因果关系链,将它展开可表示为:

$$f: O(u_0, \epsilon_n) \times O(Y, (t_0, k_0), \epsilon_1) \rightarrow O(Y, (k_1, k_1), \epsilon_1)$$

$$f: O(u_1, \epsilon_n) \times O(Y, (t_1, k_1), \epsilon_1) \rightarrow O(Y, (k_2, k_2), \epsilon_1);$$

其中:  $t_0 < t_1 < \dots < t_i < k_1, k_0 < k_1 < \dots$ , “ $\times$ ”是集合的笛卡尔积,  $Y, (t, k)$  是被控对象在时间  $t \sim k$  之间的状态集。在上述因果链中去掉前面的有限项,其余部分称之为它的子链,从上述链中任取中间有限项称之为它的一个片断,这样形成关于被控对象因果关系的表象集  $I_c$ , 对  $\forall f \in I_c, f$  外延至  $O(f, \epsilon_c)$ , 这样  $I_c$  扩充为  $I_n$ , 表象以三元组的形式固定下来:  $s = (x, t, v)$ ,  $s$  是该表象的名,  $x$  是它在时空坐标系中的空间位置,  $t$  是它的时间,  $v$  是它的值,这样状态的轨迹片断可表为  $\{s_i\}$  的一个序列  $\{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ , 其中  $s_i = (x_i, t_i, v_i), t_1 < t_2 < \dots < t_n$ , 这样一个轨迹的片断就可用以

刻画被控对象的变化情况;同样对于输入作用有  $u = (x, t, \mu)$ ,  $x, t$  同上,  $\mu$  是  $u$  的值,这样一个因果关系片断可表述为一个算子方程

$$F_n \cdot \begin{bmatrix} s_0(x_0, t_0, v_0) & u_0(x_0, t_0, \mu_0) \\ s_1(x_1, t_1, v_1) & u_1(x_1, t_1, \mu_1) \\ \vdots & \vdots \\ s_{n-1}(x_{n-1}, t_{n-1}, v_{n-1}) & u_{n-1}(x_{n-1}, t_{n-1}, \mu_{n-1}) \end{bmatrix} = s_n(x_n, t_n, v_n)$$

其中  $F_n$  表示一个因果关系片断。

## 三、基于知识的推理

传统的专家系统中占据核心地位的是其推理机构和推理策略,搜索和匹配是使推理得以进行的关键技术,从根本上说,推理离不开判断。在这里判断是控制体将获得的信息纳入到表象集下某个概念,这是通过比较来实现的,信息首先纳入前述之控制体的时空坐标系,通过比较与之最接近的几个概念被激活,它与这  $n$  个概念之间的关系可用它与它们之间的距离表示,这样推理前行了一步,  $n$  个相关概念继续上述过程,推理不断前行,综合表象不断构筑。从动力学的观点看,综合表象构筑的动因可分为内部的和外部的,内部的可称为动机驱动的,外部的可称为事件驱动的,事件驱动是一个被动的过程,以往各种控制策略都可归于此类,动机驱动则是一个主动的过程,它是由控制的命题所决定的。从广义上说,与过程控制有关的命题可分为这样几种:①对过程建模;②状态估计;③最优控制和④故障诊断。这些命题成为赋予控制体的动机,同时又是给予它的概念而成为它的表象。建模的过程表达为寻找因果关系链(包括子链和片断),或是对已有因果关系的修正,这是学习的过程。状态估计表达为根据已有经验和直接观测到的状态寻求不可直接观测或尚未观测到的状态及其变化,这是推理的过程,同时要求经验能切中对象的动机使学习渗入到这个过程中。故障诊断也是一个推理过程,根据经验和所观测或推理的异常状态及因果关系,寻求异常状态的出处,最优控制是表达为另外一种形式的推理过程,根据当前状态  $s^0$  和目标状态  $s^*$ , 在  $I_c$  中寻找一个子集  $u^*$ , 按照某给定的性能指标,以及  $I_c$  中的子集  $b$ , 使  $s^* = b(u^*, s)$ , 其它最优调度和管理优化等问题从本质上与此类似。最优控制以通常的方式表述为目标函数最大或最小的性能指标以及约束条件集,这些都可纳入控制体的时空坐标系。从控制的最终目的来说,建模或状态估计都是为实现最优控制服务的。性能指标被给予控制体成为其原始的动机,并由此派生出学习的动机,即使经验能切中其对象,以及其它派生动机。在这样一些动机的驱使下,控制体不仅要应

付被控对象的变化而进行事件驱动的推理,而且同时进行自为的假设并进行推理,进行综合表象的构筑;不仅从控制的进程中学习,而且从其自为的综合表象过程中学习。

#### 四、知识的学习

控制体在推理判断的同时所进行的上述两种学习,其具体地体现在状态概念集  $I_s$  的扩充、因果关系概念集  $I_c$  的扩充,以及它们的细致化。 $I_s$  的细致化是  $e_s$  的缩小,而  $I_c$  的细致化则是  $e_c$  的缩小和程度概念的细致化,同样  $I_s$  的扩充和细致化也是如此。需要指出的是,无论  $I_s$ 、 $I_c$  或  $I_e$  都不是孤立的、无故地扩充,它们都是出于某种动机的驱使,在扩充中相互关联、相互影响,首先被给予的是原始动机,优化控制的性能指标被给予控制体成为其原始的动机,经验切中对象是实现原始动机的必要条件,有效的控制是另一必要条件,此二者成为派生的动机,这三种动机可称为是控制体最重要的动机,学习不仅是将未知的变成已知的,而且是将已知的知识中的错误加以修正,从这个观点看,知识的于控制体的表达、推理和学习这三者是密切相关的,不可以任意割裂它们之间的关系。当新的信息不能明确由已知的概念涵盖的时候,这个新的信息就需要用一个记号固定下来成为新的概念,同时建立这个概念与其它已存在的概念之间的联系,形成更高一个层次的概念。我们说概念是有层次的,是指控制体直接从被控对象获得的信息所形成的概念是最基本层次的,它们是被控对象的状态,向上是状态概念之间的联系,即状态的轨迹片断,再上是状态变化与输入之间的关系的表象,这是基本的因果关系的概念,更高层次的则是因果关系的进一步抽象,它所反映的是因果关系的规律。因此,控制体来自被控对象的信息的符号化与控制体自为的综合表象的学习是关联的,前者是后者的基础。用代数学的方法来描述这一过程,它是这样的,如果两个因果关系的片断可被一个比它们更长的片断覆盖,则说这两个片断关于长的片断是同属的,所有同属的片断都拼接起来,则若干个短片断的拼接被另一个长片断的拼接所覆盖,这样原来的因果关系片断集被划分为若干个等价类,同时产生一个等价关系  $\text{cover}$ , 则新的片断集  $PH'$ , 是原片断集  $PH_s$  的关于  $\text{cover}$  的商集,即:  $PH' = PH_s / \text{cover}$ , 换言之,  $PH'$  是  $PH_s$  的一个抽象。

控制体在被控对象进程中的学习很容易理解,而控制体从自为的综合表象过程中的学习则是指:控制体在推理和实施推理的结果以进行对被控对象行为的控制和优化的同时,不断地进行自为假设,并

以其假设为起点进行推理。比如上述的抽象就是这种推理和学习;再如,控制体不断地设定输入来预测状态的变化,寻找可能满足原始动机的输入输出对应关系并加以标记固定下来,成为一个最优控制的表象;当未曾改变原控制作用时,系统正运行于某稳定点,一些无法观测的扰动造成被控对象状态的变化,这种变化可能会随系统稳定下来而消除,也可能成为状态继续变化的一个征兆,出现第二个变化,那么前后两个变化被作为一种因果关系而固定下来,这种现象的几次重现就印证了控制体学习的正确性,控制体就从这个征兆出发,寻找对策,以便在征兆出现时控制它。对控制体来说,它没有单纯地为了建模而认知被控对象的动机,它对被控对象的建模和优化以及它的控制与优化控制被控对象的原始动机是分不开的。

控制体验证其所学习知识的正确性的途径只能是以对被控对象的观察来实现,通过观察来验证或修正其对被控对象进程中学习和认识的谬误。这样,我们就建立了控制体较为完整的学习机制。

**小结** 本文对当前智能控制的研究现状作了简要的总结,提出建立工业过程智能控制的知识计算理论,它的研究内容和方法。进一步研究了工业过程智能控制知识在实空间中的表达方法,基于知识的推理方法和学习机制。这一智能控制知识计算理论研究的意义在于:为智能控制进一步的发展奠定了一个理论和技术的基礎。

#### 参 考 文 献

- [1] Saridis G. N., Toward the Realization of Intelligent Controls, Proc. of IEEE, Vol. 67 No. 8, 1979
- [2] 李祖枢, 智能控制——人工智能、控制理论和计算机科学的交叉, 中国人工智能学会、计算机视觉与智能控制学会首届年会论文集, 1989
- [3] 蔡自兴, 智能控制的结构理论, 同[2]
- [4] 蔡自兴, 智能控制, 电子工业出版社, 1990
- [5] 吕勇哉, 现代工业控制与人工智能, 中国自动化学会1988年学术年会论文集
- [6] K. S. Fu, 模式识别及其应用, 科学出版社, 1983年
- [7] Maier J., et al., Application of Fuzzy Set Theory, IEEE Trans. Syst. Man & Cybern., Vol. SMC-15, 1985
- [8] 李平, 精确——模糊集成控制策略的研究及工程应用, 浙江大学博士学位论文, 1987
- [9] 钟信义, 信息科学原理, 福建人民出版社, 1988
- [10] 鲍立威, 黄小强, 钱积新, 工业过程智能控制知识的计算问题, 浙江大学学报, 1994年