

智能控制理论研究

李祖枢

(重庆大学自动化系)

摘要 本文主要探讨建立智能控制理论问题,并从人工智能产生式系统理论和控制论方法论的观点出发,较系统地阐述了该理论的基本内容.

关键词: 智能控制理论, 人工智能, 专家系统, 知识表达

1 前言

近30年来自动控制技术由于人工智能、控制理论和计算机科学的交叉取得了很大的进展.新一代控制理论——智能控制理论正在逐步形成之中^[1-6].虽然,从不同的认识论和方法论出发的各类控制理论,诸如分层递阶自组织控制、知识基控制、模糊控制、专家控制、脑模型控制和手动控制等竞相发展,但它们都处于探索、开拓和发展的初期,系统的理论体系还远未形成.

自动控制技术研究的最终目的是造出能代替人进行控制的机器.可以说,自动控制研究最初就是从模仿人的控制行为开始的,从开环、闭环控制向着自适应、自校正控制和自组织、自学习控制发展的过程就是控制技术的智能程度(智商)提高的过程.而现今智能控制研究的兴起只不过是人们对自动控制本质认识的深化而已.

任何一个控制系统都由被控对象和控制器两大部分构成(如图1所示).经典和现代控制理论的主要研究目标是被控对象,控制器设计建立在对象数学模型已知的基础之上.但从人工智能问题求解的基本观点看,一个控制系统的运行,实际上就是控制机构对控制问题的求解.若控制器是人,该系统就称为人-机系统或手动控制系统;若控制器是机器(如计算机),而它又是模仿人(控制专家)的控制行为去自主地解决复杂多变的控制问题,我们就称其为智能控制系统或专家式控制系统.显然智能控制研究的主要目标是仿人智能控制机构的研究,即智能控制器模型的建立.

综上所述,笔者认为在对人的控制结构宏观模拟的基础上研究人的控制行为功能并加以模拟和实现,是当前研究智能控制的必由之路.在结构和功能上,智能控制器的基本特点是:(1)分层的信息处理和决策机构(高阶产生式系统结构);(2)在线的特征辨识和特征

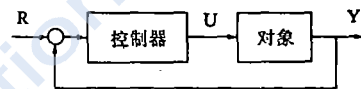


图1 控制系统的基本组成

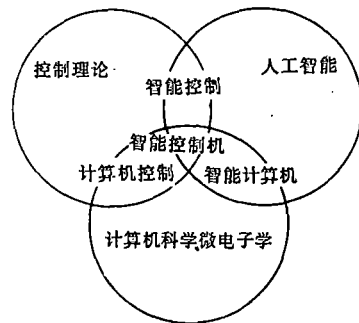


图2 人工智能、控制理论和计算机科学理论的交叉

记忆；(3)开、闭环控制结合和定性决策与定量控制结合的多模态控制；(4)启发式和直觉推理逻辑的应用。

从控制理论的观点上看，这里出现了一系列新概念和新方法。其中，启发与直觉推理逻辑由产生式规则描述；特征辨识和记忆根据系统动态特征模型在线进行；特征模型的建立与模式识别和知识表示技术息息相关；开、闭环结合，定性决策与定量控制结合的多模态控制，充分利用了控制理论的成果；分层递推(高阶产生式)的信息处理与决策机构需要计算机软、硬件及其发展的支持。应当说这一切充分体现了人工智能、控制理论和计算机科学的交叉和结合(见图2)。

2 智能控制理论的基本概念

智能控制研究最基本的途径之一是“仿人”或“仿智”，即在宏观结构和行为功能上对人控制器(控制专家)进行模拟。在人参与的控制过程中，经验丰富的操作者不是依据数学模型，而是按积累的经验和知识(例如系统动态响应中出现的特征信息)推理并在线确定或变换控制策略。智能控制理论认为，反映系统运动状态的所有动态信息特征构成了系统的特征模型。特征模型是特征辨识的依据，是控制器应有的先验知识。

定义1 特征模型 Φ 是对智能控制系统动态特性的定量与定性描述相结合的模型，是针对控制问题求解和控制指标要求的不同，对系统动态信息空间 Σ 的一种划分(见图3)，划分出的每一区域分别表示系统的一种特征状态 φ_i 。特征模型为所有特征状态的集合，即

$$\Phi = \{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_i\}, \quad \varphi_i \in \Sigma \quad (1)$$

图3(a)中被划分出的每一块区域对应于图3(b)偏差响应曲线上的一段，表明系统正处于某种特征状态，例如

$$\varphi_i = [e \cdot \dot{e} > 0 \wedge |\dot{e}/e| > \alpha \wedge |e| > \delta_1 \wedge |\dot{e}| > \delta_2] \quad (2)$$

表明系统正处于受扰动作用而以较大速度偏离目标值的状态，式中 α 、 δ_1 和 δ_2 都为某一阈值。值得注意的是随问题求解的目标(控制输出、参数校正或任务适应等)不同，同一信息空间的特征模型 Φ 将各不相同。

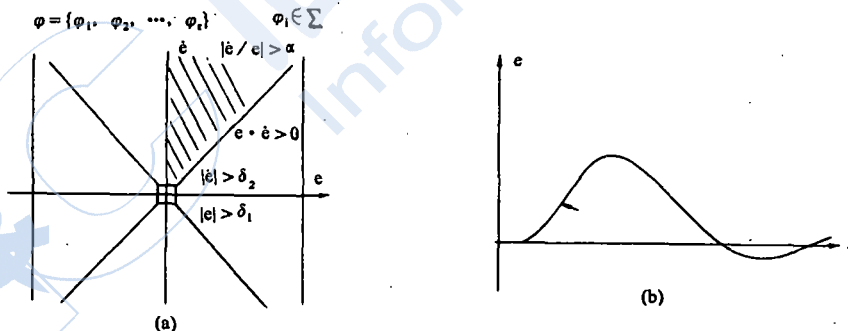


图3

(a) 一种简单的特征模型

(b) 系统的误差响应曲线

从(2)式可以看到，特征状态由一些特征基元 q_i 的组合来描述，设特征基元集为

$$Q = \{q_1, q_2, \dots, q_m\} \quad (3)$$

其中，对误差信息空间而言常用的有

$$q_1: e \cdot \dot{e} \geq 0, q_2: |\dot{e}/e| > \alpha, q_3: |e| < \delta_1, q_4: |e| > M_1,$$

$$q_5: |\dot{e}| < \delta_2, q_6: |\dot{e}| > M_2, q_7: |e_{m-1} \cdot e_m| > 0, q_8: |e_{m-1}/e_m| \geq 1, \dots$$

式中 δ_1, δ_2, M_1 和 M_2 均为阈值, e_{mi} 为误差的第 i 次峰值, 则特征模型 Φ 与特征元集的关系为

$$\Phi = P \odot Q \quad (4)$$

式中 Φ 为 n 维向量, Q 为 m 维特征基元向量, $P = [p_{ij}]_{n \times m}$ 为 $n \times m$ 阶关系矩阵, p_{ij} 可取 $-1, 0, 1$ 三个值, 分别表示取反、取零和取正; 符号 \odot 表示一种“与”矩阵相乘关系

$$\varphi_i = [(p_{i1} * q_1) \wedge (p_{i2} * q_2) \wedge \dots \wedge (p_{im} * q_m)]$$

当 $p_{ij}, j=1, 2, \dots, m$, 中除 $p_{i1}=1, p_{i2}=-1$ 之外均等于零时

$$\varphi_i = [e \cdot \dot{e} \geq 0 \wedge |\dot{e}/e| \leq \alpha]$$

定义 2 特征辨识是智能控制依据特征模型 Φ 对采样信息在线处理, 模式识别确定系统当前处于什么样的特征状态的过程。

在整个控制过程中, 控制器将接受大量的信息, 将其记忆下来可以评判控制效果、确定控制策略、校正控制参数和影响控制输出。但控制器记忆容量有限, 不能全部记忆。实际上对于控制与决策而言, 这些信息中绝大多数是冗余的, 真正需要记忆的只是一些特征信息。

定义 3 特征记忆是指智能控制对一些反映前期决策与控制效果的特征量和反映控制任务要求及被控对象性质的特征量的记忆。记特征记忆量集合为

$$\Lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_p\}, \lambda_i \in \Sigma \quad (5)$$

其中常用到的特征记忆量有: $\lambda_1: e_{mi}$ —误差的第 i 次极值; $\lambda_2: u_H$ —前期输出量的保持值; $\lambda_3: \dot{e}_{0i}$ —误差的第 i 次过零速率; $\lambda_4: t_{em}$ —误差极值间隔时间。

采用特征记忆的好处有: ①可以直接影响控制与校正的输出量, 以改善控制效果; ②可作为自校正、自适应和自学习的根据; ③可用作系统稳定性监控的依据; ④记忆效率高, 占用存储单元少。

人的控制策略是灵活多变的。不仅对象不同控制策略各异, 而且即使同一对象在不同的动态响应状态下或在不同的控制要求下控制模态也会不同。

定义 4 控制(决策)模态集合 Ψ 是指控制输出 U 与输出信息 E 和特征记忆信息 Λ (合起来记为 R) 之间的某种定量或定性映射关系 F 的集合, 即

$$\Psi = \{\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_r\} \quad (6)$$

其中, $\psi_i: u_i = f_i(e, \dot{e}, \lambda_j, \dots)$, 或 $\psi_i: f_i \rightarrow \text{IF 条件 THEN 操作}$ 。

智能控制理论认为: 智能控制中这种不断变化策略的控制方式, 称为多模态控制(决策)。

这种通过特征辨识识别出系统当前处于什么特征运动状态, 并立即采取相应的控制模态的过程, 实际上可以看成是对人的启发式和直觉推理逻辑的一种模仿。

定义 5 启发与直觉推理规则集 Ω 是对人(专家)决策过程的一种模仿, 它依据特征辨识结果确定决策与控制策略, 可用产生式规则形式“IF...THEN...”予以描述。

总而言之, 特征辨识与多模态控制可以说是一种具有二次映射关系的信息处理过程。即

$$\begin{aligned}
 \Omega_1: \Phi_1 &\rightarrow \Psi_1 \quad \Omega_1 = \{\omega_{11}, \omega_{12}, \dots, \omega_{1r}\} \\
 \omega_{11}: \text{IF } \varphi_{11} &\text{ THEN } \psi_{11} \quad (\text{定性映射}) \\
 \Psi_1: R_1 &\rightarrow U_1 \quad \Psi_1 = \{\psi_{11}, \psi_{12}, \dots, \psi_{1r}\} \\
 \psi_{11}: u_{11} &= f_{11}(e, \dot{e}, \lambda, \dots) \quad (\text{定量映射}) \\
 \text{或 } f_{11} &\rightarrow \text{IF 条件 THEN 操作} \quad (\text{定性映射})
 \end{aligned} \tag{7}$$

为简化起见, (7)式可由二个三重序元关系予以描述, 设智能控制过程 IC, 则

$$\begin{aligned}
 \text{IC}_1 &= \langle \Phi_1, \Psi_1, \Omega_1 \rangle \\
 \Psi_1 &= \langle R_1, U_1, F_1 \rangle
 \end{aligned} \tag{8}$$

控制模态集 Ψ_1 也是智能控制应有的先验知识. 实际上每一个控制模态都是由一些模态基元构成的, 例如组成分层递阶智能控制最低层次控制模态集的常用模态基元有

$m_1: k_p e$ 比例, $m_2: k_d \dot{e}$ 微分, $m_3: k_i \int e dt$ 积分, $m_4: u_H$ 输出保持,

$m_5: k \sum_{i=1}^n e_{mi}$ 峰值误差记忆和, $m_6: \pm u_m$ 乒乓输出, $m_7: u \pm a$ 输出预补偿...

则该层次控制模态集 Ψ_1 与模态基元之间关系

$$\Psi_1: U_1 = L_1 M_1 \tag{9}$$

式中, U_1 为输出向量, M_1 为模态基元向量, L_1 为关系矩阵, 其中元素只有 1, 0 和 -1 三种. 例如由此构成的控制模态有

$\psi_{11}: u = u_H + k_p e + k_d \dot{e}$ 比例微分 + 保持

$\psi_{12}: u = k \sum_{i=1}^n e_{mi}$ 开环观察保持

$\psi_{13}: u = \pm u_m$ 乒乓

$\psi_{14}: u = u_n \pm a$ 非线性死区预补偿

...

人体司管运动控制的神经系统是一个多层的控制系统, 各部分分工协调并行运行, 各层次控制遵循层次越高, “智能增加精度降低”⁽³⁾ 的原则. 不过应指出的是低层次要求精度高, 信息处理快, 尽管相应来说智能程度显得低一些, 但由于智能因素的存在, 导致其具有极为高超的控制技巧. 因此智能控制也具有类似的分层信息处理和决策机构.

大多数人工智能系统都采用了产生式系统结构. 产生式系统由数据库、规则库和推理机(也称为规则应用模块、规则解释器或规则控制器)组成⁽¹⁰⁾, 它方便地描述了问题求解过程. 多层次的问题求解过程对应着高阶产生式系统结构. 高阶产生式系统由目标级和间接级(高层次)产生系统组成, 较高级的产生式系统解决较低级产生式系统中的状态描述、操作改变以及规则或策略的选择等问题, 间接影响着目标问题的求解.

定义 6 智能控制的分层信息处理与决策机构是求解控制问题的一种高阶产生式系统结构, 如图 4 所示按层次高低可分为: 中枢司令级 CC、组织协调级 OC 和单元控制级 UC. 每一单元控制级 UC 又由如图 5 所示的二阶产生式系统结构(任务自适应级 TA、参数自校正级 ST 和运行控制级 MC)组成.

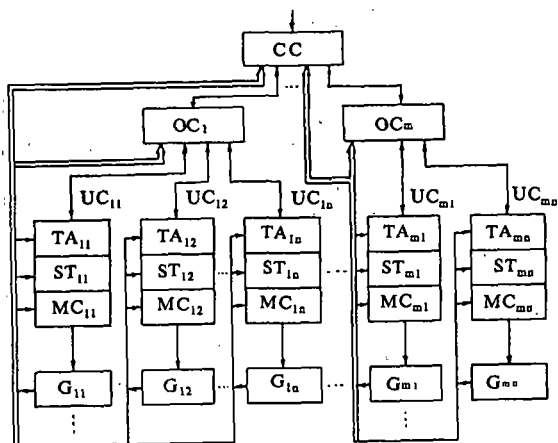


图4 智能控制的分层结构

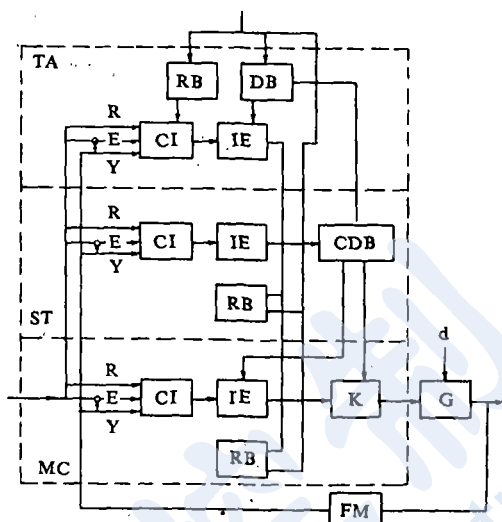


图5 UC的二阶产生式系统结构

运行控制级 MC 是目标级产生式系统，它直接面对实时控制问题，构成 0 阶产生式系统。参数校正级 ST 解决 MC 中控制模式的参数自校正问题，它面对实时控制，与 MC 一起构成一阶产生式系统。当控制环境或被控对象发生较大变化或当上级给定任务变更时，任务自适应级 TA 解决 MC 或 ST 中特征模型、推理规则和决策与控制模式的选择、修改乃至生成的问题，它更面对实时控制问题，与 ST 和 MC 一起构成单元控制级的二阶产生式系统。作为一高阶产生式系统的各级，MC，ST 和 TA 三级都有各自的数据库 DB、规则库 RB、各自的特征辨识器 CI 和推理机 IE，三级之间蕴含的信息交换通过对公共数据库 CDB 直接存取数据来完成。这种紧耦合的并行运行机制便于单元控制级快速自适应过程的完成。多个单元控制级的任务规划及相互协调由组织协调级 OC 来完成。OC 级依据中枢司令级 CC 的命令和其它组织协调要求以及来自各单元控制级的反馈信息特征，确定所属各单元控制级的任务和对其它 OC 级的要求。OC 及其所属 UC 构成了三阶产生式系统。具有类似结构的多个 OC 级组成协作网络，受更高级产生式 CC 级的控制管理，它们一起构成具有四级产生式系统结构的综合智能控制系统。进而多个综合智能控制系统按不同的递阶结构联合，由更高级的产生式系统控制，以解决更复杂或范围更广的问题。如此类推，按控制决策的不同要求和问题求解的复杂程度及范围，可建立起 n 级产生式系统结构的智能控制系统体系。显然，阶数的高低和各级产生式系统求解问题的效率，在一定程度上反应了智能控制系统拥有的知识水平和“智商”。 n 阶产生式系统各级结构均由前述(7)式和(8)式那样的二次映射关系所描述，即

$$\begin{aligned}
 IC &= \langle \Phi, \Psi, \Omega \rangle \\
 \Psi &= \langle R, U, F \rangle
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

其中 $\Phi = \{\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n\}$; $R = \{R_1, R_2, \dots, R_n\}$; $\Psi = \{\Psi_1, \Psi_2, \dots, \Psi_n\}$; $U = \{U_1, U_2, \dots, U_n\}$; $\Omega = \{\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_n\}$; $F = \{F_1, F_2, \dots, F_n\}$.

3 智能控制理论研究的基本内容

建立智能控制系统的目的是为了获得一个好的自动控制效果, 因此在新的认识论与方法论基础上, 智能控制理论研究除几乎涉及到了传统控制理论所讨论的全部内容而外, 还应涉及有关智能的量测及特性分析和智能控制机的硬、软件及其实现研究等等.

3.1 建模方法与知识表达

在计算机辅助下智能控制系统的建模(特征模型和多模态控制模型)理论及方法研究就是专家控制系统的知识获取与表达方法研究. 根据下述理由, 我们采用了图6所示人-机学习训练系统(智能控制开发系统).

- 1) 智能控制是对人控制器的模拟, 是对控制专家经验的总结. 人-机训练系统便于设计者把自己当作控制专家, 通过反复试凑的过程学习训练, 构造和改进智能控制各级的特征模型和多模态决策与控制模型, 使之在一定条件下达到满意的仿真控制结果.
- 2) 由于非线性、时变性和不确定性的影响导致对象及环境特性变化的极限总可以用近似的线性化模型在结构和参数上大幅度的变化予以模拟.
- 3) 计算机数字仿真可以把实际的快过程放慢或在任意点中断, 便于离线研究和总结经验.

智能控制系统的知识表达, 有定性定量相结合的部分, 也有确定与不确定和模糊相结合的部分. 为了统一直观和清晰地表达它的知识模型, 文献[8]中提出了FRG图示法. 其基本结构为五重序元关系

$$C = \{P(\cdot), T, I, O, CF\} \quad (11)$$

其中, $P(\cdot)$: 位置的模糊集, 其属度由 (\cdot) 表示; T : 转移(映射)的集合; I : T 的输入函数, 其中 \wedge, \vee, \sim 分别表示输入之间的“与、或、非”关系; O : T 的输出函数, 与 I 的表示相同; CF : 转移的可信度集合.

基本符号为

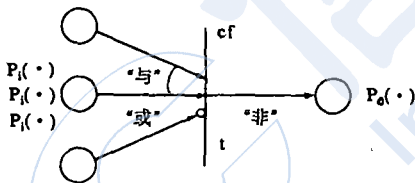


图7表示了某一智能控制单元控制器的FRG模型.

3.2 性能指标

传统控制理论中衡量一个系统性能好坏的指标有两大类. 第一类是经典时域指标(上升时间 t_r 、超调量 σ 、过度过程时间 t_s 和稳态误差 e_s); 第二类是基于偏差的泛函指标(IAE, ISE 和 ITAE 等). 从信息映射的观点看, 传统控制器的输入与输出之间仅是一定量的单映射函数关系, 欲通过这样的关系实现第一类四个指标的优化是不可能的, 只能在它们中折衷, 即以第二类指标为优化的目标函数. 由于智能控制的输入与输出之间是一种多映射关系, 且每一控制方式都在同一动态过程的某特征状态下被采用, 因此每一模态总可以强化某一特定指标, 结果导致整体性能比单映射时的最优控制要好.

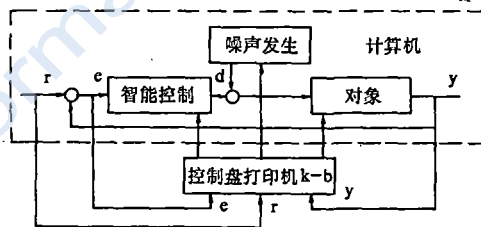


图6 智能控制系统设计的人-机学习训练系统

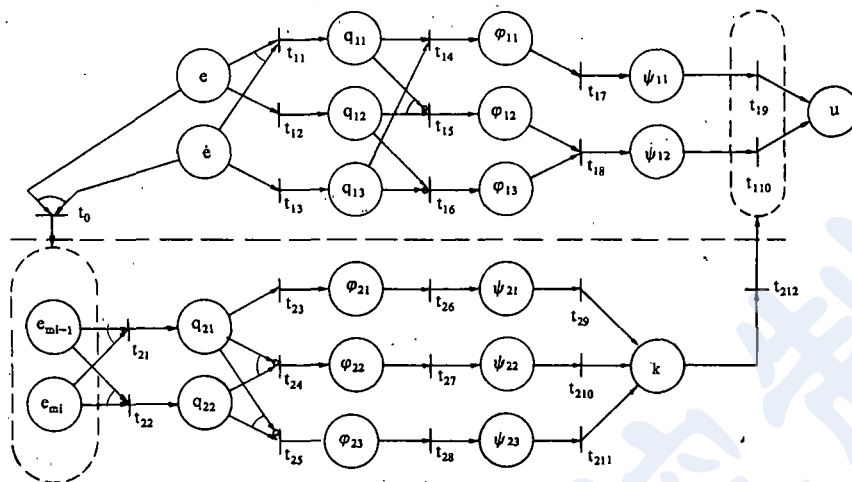


图7 某智能控制单元控制器的FRG模型

3.3 稳定性监控

一个控制系统正常工作的首要条件是系统必须稳定. 系统出现不稳定的根本原因, 从经典和现代控制理论来看, 实质是系统内都存在着正反馈, 即有闭环极点在复平面的右边; 从李雅普诺夫稳定判据来看, 实质是系统能量能否在平衡点达到极小值. 在传统理论中稳定性的研究依赖于对象的数学模型. 对智能控制系统而言, 一则对象模型不知, 二则它本身是一带有记忆的非线性控制器, 因此传统的稳定性概念和判据直接运用是不行的. 那么在智能控制系统中应当怎样来解决稳定性的问题呢? 智能控制理论认为, 系统的输出响应是系统输入和系统内特性的综合反映, 不稳定趋势的出现总是以一定特征反映到系统的响应之中. 例如图8中误差峰值比 ζ_m 、误差过零速度比 ζ_0 、误差报警阈值 θ_e 等, 这些特征的全体可构成判定系统不稳定的特征模型. 判定系统的不稳定的特征模型和智能控制应采取的相应处理措施, 作为先验知识记入智能控制之中, 同样构成一求解稳定性问题的产生式系统后, 智能控制在预定的监控范围内形成了一超稳定系统. 这样的方式也称为稳定性监控.

3.4 多变量控制的解耦

多变量系统耦合问题是传统控制理论中的一大难题. 在对象数学模型已知的情况下求解多变量问题的常规方法是设计解耦器和单回路控制器. 实际上, 由于对象及环境的不确定性和模型的近似性, 理想的解耦很少有可能.

若把多变量系统解耦及不确定性表示为

$$(G + \Delta G)(D + \Delta D) = GD + G\Delta D + \Delta GD + \Delta G\Delta D \quad (12)$$

式中 G , ΔG 分别表示被控对象动态特性中的确定和不确定部分; D , ΔD 分别表示解耦及控制器特性的确定和不确定部分, 则对智能控制而言, (12)式中 D 可以看成是一种先验协调器, 这容易在对对象性质初步了解或在线测辨中得到, 例如一个纯数值的静态解耦矩阵; 而(12)式中的后三项都可等效看成是一种不确定性干扰, 它们都以一定的特征形式, 综合反映在系统的输出或误差响应特性中, 例如图9中负调部分表现出的特征, 误差负调峰值 e_{vsm} , 负调峰值时间 t_{vsm} 等. 这些特征也可归于多变量智能控制特征模型之中⁽⁹⁾.

3.5 可控性、可达性和可信度

传统控制理论中可控性的概念是对被控对象而言的,即能否通过控制使对象从某一初始状态点达到希望的任意状态点,而不管其运动路径如何(点状态可控性);或能否从某一

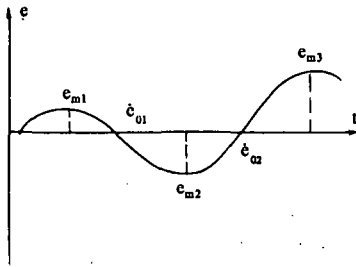


图8 系统不稳定性的特征表现

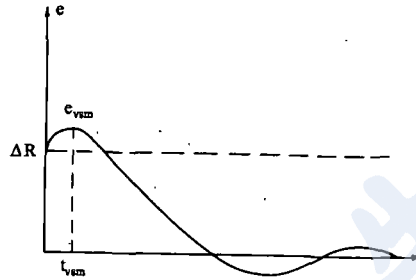


图9 耦合在响应曲线中反映出的特征

初始输出状态通过控制使其按一定轨道达到预定的输出状态(函数可控性)⁽¹¹⁾.当然以上可控性的分析都是建立在数学模型已知的基础上的.在智能控制系统中,由于对象模型未知,传统可控性概念已不适用.不过对智能控制控制器我们主要关心的是控制器自身的控制能力.鉴于智能控制各级求解问题的目标分别直接或间接影响其控制能力和控制效果,特别在高层次推理中存在着模糊性和不精确性.故在智能控制的设计和分析中,对系统的能控性、推理的可达性及推理的可信度等概念的研究显得十分重要.

例如,对运行控制级 MC 而言,能控的必要条件是二次映射关系

$$\begin{matrix} \Omega_1 & & F_1 \\ \Phi_1 & \rightarrow & \Psi_1, & R_1 & \rightarrow & U_1 \end{matrix}$$

是一个满射,否则可能出现“失控”现象.对参数校正级 ST 和任务适应级 TA 而言,可达性是保证当对象特性改变或控制任务变化时,运行控制级仍然能控.其必要条件也是

$$\begin{matrix} \Omega_2 & & F_2 & & \Omega_3 & & F_3 \\ \Phi_2 & \rightarrow & \Psi_2, & R_2 & \leftarrow & U_2; & \Phi_3 & \rightarrow & \Psi_3, & R_3 & \rightarrow & U_3 \end{matrix}$$

在一定范围内是满射,即具有完备的推理.

在具有自学能力的高层产生式系统中,特征模型可能存在模糊性,推理也可能存在不精确性和多值性,定义可信度以描述这种情况.确定推理的有效和优化十分必要.智能控制理论中借用了 Shorliffe 等⁽¹³⁾的可信度理论来处理这方面的问题.

3.6 智商指数

不同的智能控制机在控制效果和克服不确定性能力方面是不一样的,它们之间的差别可认为是其拥有的智能程度差别所致.我们定义“智商指数”IE 来度量智能控制系统的智力高低

$$IE = IE_C(x, y, z) + IE_A(x, y, z) + IE_L(x, y, z) + IE_{CO}(x, y, z) + IE_D(x, y, z) + \dots \tag{13}$$

其中, $IE_C(x, y, z)$ —控制能力指数; $IE_A(x, y, z)$ —适应能力指数; $IE_L(x, y, z)$ —学习能力指数; $IE_{CO}(x, y, z)$ —协调能力指数; $IE_D(x, y, z)$ —决策规划能力指数. x, y 和 z 分别表示输出、输入和评判标准.当 x 在测量范围内变化时, y 与 z 相差程度的大小决

定能力指数的高低。

3.7 多 CPU 智能控制机

智能控制控制器具有分层递阶信息处理结构和并行信息流驱动方式，多处理机系统为其实现提供了最佳硬、软件基础。

适用于智能控制的多微处理器专用控制机是一个由多个微处理器按适当方式互连而成，在整体管理下通过共享变量和消息传送等方式进行通讯协调，并行处理分层递阶子任务，共同完成指定的单元控制任务的专用计算机系统。其结构框图如图 10 所示⁽¹²⁾。

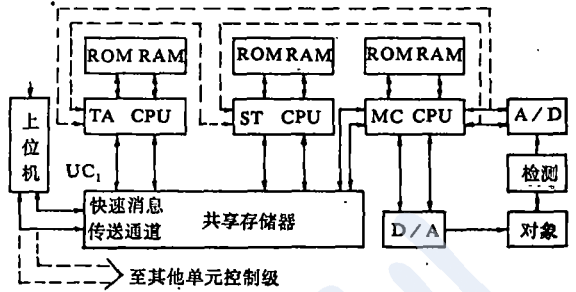


图 10 智能控制多微处理机结构

4 智能控制单元控制器设计仿真例

重庆大学智能控制研究室曾对各类被控对象设计了相应的智能控制控制器^(9,12)。下面介绍一单元控制器 UC 的设计实例及应用的仿真结果⁽¹²⁾，它是针对多变量时延过程控制而设计的。

UC 运行控制级的解耦协调器为

$$K = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix}$$

特征集模型为

$$\Phi_1 = P_1 \odot Q_1 = \begin{bmatrix} -1 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 & 1 & 0 \\ -1 & -1 & -1 & 0 & 1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \odot \begin{bmatrix} q_{11} \\ q_{12} \\ q_{13} \\ q_{14} \\ q_{15} \end{bmatrix}$$

其中特征基元 $q_{11}: |e| < \delta_1$, $q_{12}: |\dot{e}| < \delta_2$, $q_{13}: e \cdot \dot{e} \geq 0$, $q_{14}: |\dot{e}/e| < \alpha_1$, $q_{15}: |\dot{e}/e| > \alpha_2$ 。

控制模态集模型为

$$\Psi_1: U = L_1 M_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{11} \\ m_{12} \\ m_{13} \\ m_{14} \\ m_{15} \end{bmatrix}$$

其中模态基元 $m_{11}: k k_p \sum_{i=1}^n e_{m_i}$, $m_{12}: k_1 \int e dt$, $m_{13}: k_p e$, $m_{14}: (1-k)k_p$, $m_{15}: k_p e$ 。

UC 参数校正集的特征模型为

$$\Phi_2 = P_2 \odot Q_2 = \begin{bmatrix} -1 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & -1 & -1 \end{bmatrix} \odot \begin{bmatrix} q_{21} \\ q_{22} \\ q_{23} \\ q_{24} \\ q_{25} \end{bmatrix}$$

其中特征基元为 $q_{21}: |e| < \delta_1$, $q_{22}: |\dot{e}| < \delta_2$, $q_{23}: |e_{m-1}| > \alpha \wedge |e_m| > \alpha$, $q_{24}: \Delta e_j, e_j \geq 0$, $q_{25}: \Delta \dot{e}_j, \dot{e}_j \geq 0$.

参数校正模态集模型为

$$\Psi_1: \begin{bmatrix} k_p \\ k_p \\ k_I \\ k_I \\ k_I \end{bmatrix} = L_2 M_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} / \begin{bmatrix} m_{21} \\ m_{22} \\ m_{23} \end{bmatrix}$$

其中模态基元 $m_{21}: 1$, $m_{22}: w_1 e_m / e_{m-1}$, $m_{23}: w_2 \cdot w_1$ 和 w_2 均为常数.

精馏塔两端成分控制系统对象的传递函数矩阵满足⁽¹²⁾

$$Y(s) = G(s)U(s) + G_f(s)F(s)$$

其中

$$G(s) = \begin{bmatrix} \frac{12.8e^{-s}}{16.7s+1} & \frac{-18.9e^{-3s}}{21.0s+1} \\ \frac{6.6e^{-7s}}{10.9s+1} & \frac{-19.4e^{-3s}}{14.4s+1} \end{bmatrix}, G_f(s) = \begin{bmatrix} \frac{3.8e^{-8.1s}}{14.9s+1} \\ \frac{4.9e^{-3.4s}}{13.2s+1} \end{bmatrix}$$

图 11 表明智能控制和预估-解耦-PI 控制对这一对象的仿真结果及当模态参数变化 50% 后二者的仿真结果.

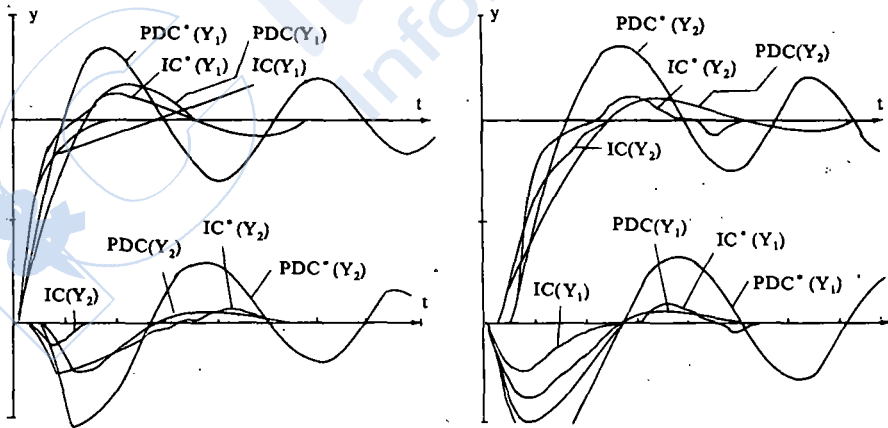


图 11 智能控制(IC)与预估-解耦-PI 控制的仿真比较

5 结束语

本文从新的认识论、方法论出发讨论了智能控制理论的基本内容,明显地可以看出,它已经不同于经典与现代控制理论。

(1) 研究的主要目标不是被控对象,而是控制器自身如何对控制专家结构和行为的模仿。

(2) 辨识与建模的目标不是对象的数学模型,而是整个系统的动态特征模型和控制器定性定量结合的知识模型。

(3) 基于特征辨识的多模态决策与控制导致了诸如:系统的稳定性、控制器的能控性、推理的可达性、多指标优化研究和智商的量测等一系列新的理论问题。

(4) 启发与直觉推理、分层递阶的信息处理和多CPU并行的计算机硬、软件系统为系统供了具有在线自学习、自适应能力的快速实时运行条件。

在智能控制理论的研究方面,尚存在许多问题值得进一步探讨,这有待于同行们的共同努力。本文只是作者研究的体会,也有待于深化。

参 考 文 献

- 1 Fu K S. Learning Control System and Intelligent Control System: An Intersection of Artificial Intelligence and Automatic Control. IEEE Trans, AC 1971; 16: 70-72
- 2 Saridis G N. Toward the Realization of Intelligent Control. Proc of the IEEE, 1979; 67(8)
- 3 Saridis G N. Knowledge, Implementation, Structure of Intelligent Control Systems. Proc of IEEE Int Symp on Intelligent Control, 1987
- 4 Åustom K J. Expert Control. Automatica, 1986; 22(3): 277-286
- 5 周其鉴, 李祖枢, 陈民铀. 智能控制及其展望. 信息与控制, 1987; 16(2): 38-45
- 6 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首届学术年会, 重庆, 1980. 4
- 7 Li Zushu, Zhou Qijian, Xu Ming. Characteristic Identification, Characteristic Memory and Intelligent Controller. Proc of Ident' 88 IFAC Symposium, Beijing, 1988: 1686-1690
- 8 Li Zushu, Wang Tingkai, Xiang Nong. A New FRG Method of Knowledge Representation and Its Application in Business Management Expert Systems. 1989
- 9 Zhou Qijian, Li Zushu, Li Yonghua. A Comparative Study on the Solution of Multi-Variable Systems Using the Intelligent Control Approach. AMST' 87 Int Symp, Plymouth, UK, 1987: 45-51
- 10 Richard F. Introduction to Knowledge Base Systems. William Gollins Sons & Co. Ltd, 1980
- 11 Rosenbrock H H. Computer Aided Control Systems Design. New York: Academic Press, 1974
- 12 李南, 陈农基, 李珩华, 陈民铀, 徐鸣, 陈伟建等. 重庆大学硕士论文, 1982-1988
- 13 Shorffiffe E H, Buchanan B G. A Model of Inexact Reasoning in Medicine. Mathematical Biosciences, 1975; 23: 351-379

A STUDY ON INTELLIGENT CONTROL THEORY

LI Zushu

(Dept. of Automation, Chongqing Univ)

Abstract

This paper lays special emphasis on establishment of intelligent control theory. Based on systems theory of artificial intelligence emersion and methodology of control theory, fundamental contents of the intelligent control theory are formulated.

Keywords: intelligent control theory, artificial intelligence, expert system, knowledge representation

全国生物控制论与医学工程学术研讨会(1991年)

研讨会于1991年4月在苏州由中国自动化学会生物控制论与医学工程专业委员会及中国生物物理学会生物信息控制专业委员会联合召开。

会议内容为：交流报告全国生物控制论研究成果及国内外研究进展；研讨“八五”期间生物控制论重点研究方向与可能的协作方式；讨论生物控制论目前的一些热点，特别是神经网络、混沌现象等发展前景与局限性。

会上还讨论了近十年来我国生物控制论研究工作的经验与教训，并对选好下一步课题，加强协作，力争“八五”期间在以下几个方面形成拳头进行了研究。它们包括①生理系统的建模与仿真；②神经信息加工模型与应用；③多指标临床综合控制研究；④一些地方病的生物控制论研究；⑤感觉信息加工神经网络理论模型与应用方法研究等。