

⑦

一个专家控制系统的设计与实现

37-43

The Design and Implementation of An Expert Control System

陈民轴

Chen Minyou

TP273

(重庆大学电子信息工程学院)

摘 要 在专家系统技术与计算机过程控制技术相结合的基础上设计了一个用于工业过程在线监控的专家控制系统。并介绍了它的设计思想、总体结构及工程实现方法,另外还给出了该系统在红矾钠回转窑生产过程中现场运行的结果。

关键词 过程控制; 专家系统 / 控制系统设计; 工程实现

中国图书资料分类法分类号 TP 273

ABSTRACT This paper proposes an expert control system for industrial processes on-line control and supervision by combining expert system techniques with computer process control techniques, introduces the fundamental design principles, basic structure and engineering implementation of this real time expert control system and gives the field operation results concerning the processing of a sodium chromate rotary kiln controlled by this expert control system as an application example.

KEY WORDS process control; expert systems/control system design; engineering implementation

0 引 言

尽管基于数学模型的控制理论解决了工程界的许多问题,取得了令人瞩目的成就,但在工业过程控制领域,仍存在大量单靠传统控制理论所无法解决的控制问题,例如冶金、化工、炼油等行业中普遍存在的大型、复杂、不确定性以及担任条件大幅度变化的对象的控制问题。

近几年来,智能控制特别是专家控制技术的迅速发展,为解决这类复杂的、难于建模的对象的控制问题提供了有效的方法^[1]。由于专家控制是以知识模型为基础,不仅可以利用现有的控制理论知识,而且可以总结和利用人的经验和直觉推理逻辑,所以对数学模型依赖性小,因而特别适用于先验知识少、难于建模、操作条件大幅度变化的场合。因此,设计出性能良好的实时专家控制系统,无疑具有重要的实用价值和广泛的应用前景。

* 收文日期 1992-04-24

1 专家控制系统的设计原则

由于专家控制是以知识为基础,它研究的是工业控制中那些复杂多变,难于建模的对象,故专家控制系统的设计必然不同于传统控制系统的解析设计方法。根据工业过程实时控制的要求,专家控制系统应具有以下特点:

①连续运行的实时性;②现场运行的高可靠性;③控制策略的灵活性;④运行环境的适应性;⑤操作维护的方便性。

专家控制系统(ECS)的设计目前尚未形成系统的理论,本文只是根据近几年的研究工作^[2]总结出了几条设计专家控制系统的基本原则,以期对设计工作起到一定的指导作用。这些原则是:

1.1 模型描述的多样性原则

在专家控制系统的设计中,对被控对象的模型和控制器模型都应采用多种描述形式。传统控制理论对控制系统的设计是根据对象的数学模型设计出满足某项性能指标的控制器模型。一旦对象的模型不准,系统就无法达到预期的控制目标,甚至连稳定性也难以保证。而专家控制系统是以知识为基础,能够处理各种定性的、定量的、精确的、模糊的信息,因此可根据被控过程的先验知识和知识获取的情况采用不同的描述形式(如解析模型、关系模型、规则模型、因果关系模型、联想记忆模型等),以便更多地反映对象特性,为智能控制提供依据。同样,对控制器模型也应采用多种描述形式,以便有效地表达已获取的知识,提高对数据和信息的管理效率。

1.2 在线信息的特征抽取与识别原则

获取信息是实现控制的前提条件,专家控制系统的重要特征之一就是能够以有用的方式来划分的构造信息。在ECS的设计中应十分注意在线信息的处理与利用。在信息存储方面,应对那些对作出控制决策有意义的信息进行记忆或保存,而对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处理相结合;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以利用,不要局限于误差和误差的一阶导数。例如,可在 $e - \dot{e}$ 平面或 $e - \dot{e} - t$ 三维空间上划分特征模式,用不同的模式反映系统的不同状态特征^[3],为专家控制的推理与决策提供丰富的信息来源。灵活地处理和利用在线信息将提高系统的信息处理能力和决策水平。

1.3 决策机构的递阶性原则

人脑本身就是由大脑、小脑、脑干、脊髓组成的一个分层递阶决策系统。作为以仿效人的智能为核心的智能控制系统,其结构必然要体现分级递阶原则。ECS的递阶结构如图1所示。高层次的决策是由知识库和推理机构来完成的,多模式控制器处在直接控制级。

1.4 推理与决策的实时性原则

从这一原则出发,ECS的知识库规模应加以限制,推理机构应设计得尽可能简单。知识表达的方式、知识库的构造和推理策略的选择都应满足工业过程实时性的要求。

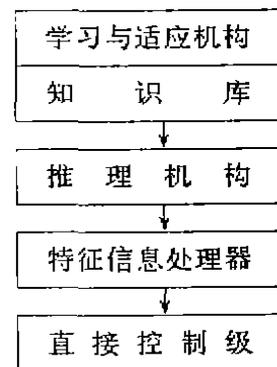


图1 ECS的分级递阶结构

1.5 直接控制的智能化原则

目前大多数智能控制系统都遵循 Saridis 的分级递阶原则,只在较高层次(组织级、协调级)上运用 AI 技术,例如系统的监控与管理,控制器参数在线校正等。而在直接控制级则仍采用传统的控制算法。事实上,在直接控制级引入 AI 及 ES 技术,建立不同形式的智能控制算法(如开闭环结合的仿人智能控制算法)^[4]。不仅能提高系统的实时性,而且大大增强了系统的控制能力和适应能力。因此,智能控制应从控制系统的最低级——直接控制级着手。

1.6 在线运行的稳定性监控原则

由于 ESC 是基于知识的系统,它在模型描述、知识表达、控制机理以及系统结构上都与传统的控制系统大不相同,因此很难用解析方法对系统进行稳定性分析。我们知道,系统输出的任何变化都会引起误差 e 及误差速率 \dot{e} 的变化。因此,可以通过建立系统的不稳定特征模型^[5]或特征函数 $F(e, \dot{e})$,通过在线特征识别反映出系统的当前状态和变化趋势,对系统的稳定性进行在线监控。一旦出现异常,即可采取相应的控制策略。为保证系统可靠运行, ECS 的控制规则集设计必须满足以下原则^[6]:

设控制器输入集为 $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$

输出集为 $U = \{R_1, R_2, \dots, R_m\}$

设 q 为 E 到 U 的一个映射,即 $q: E \rightarrow U$

则建立控制规则集的必要条件为: $q(E) = U$

即必须保证 q 是 E 到 U 的一个满射。

按上述原则设计的控制规则就能保证推理机在任何情况下都能搜索到目标,并给出相应的控制决策,使被控系统的特性向期望特性转移。稳定性是控制系统正常工作的先决条件。仿真研究和实际应用都表明,采用在线稳定性监控可以从根本上保证 ECS 的运行大范围渐近稳定。

2 专家控制系统的结构原理

根据上述原则,一个基于知识的 ECS 基本结构如图2所示。系统由三个部分组成:

(1)被控对象;(2)检测机构;(3)专家控制器(EC)。

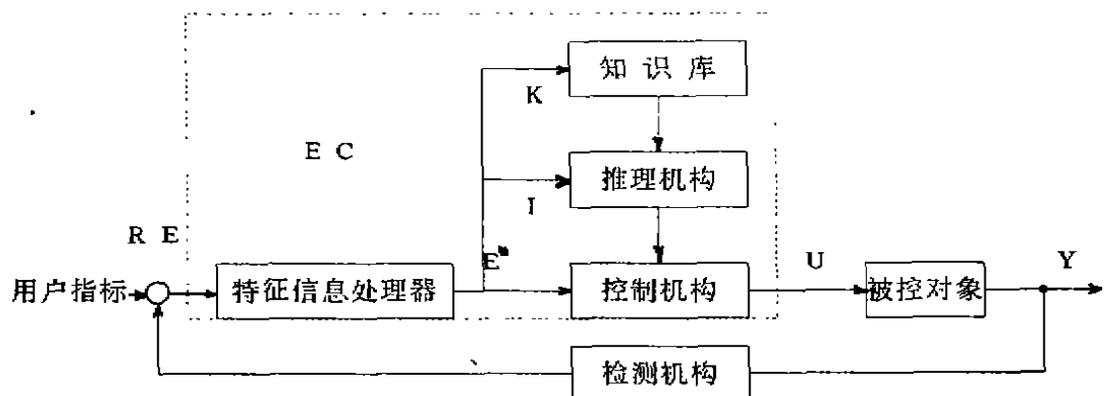


图2 专家控制系统结构图

被控过程的动态信息 E 经过特征抽取与识别,一方面送到推理机构,另一方面为知识库补充有用的信息。推理机构根据特征信息 E^* 和知识库提供的知识 K 进行判断、推理,并将结果 I 送到控制机构,从而给出合适的控制 U ,对被控过程进行控制。 EC 的输入集为

$$E = \{e_1, e_2, \dots, e_r\}$$

E^* 为特征信息输出集, K 为经验知识集, I 为推理机构输出集, EC 的输出集为

$$U = \{u_1, u_2, \dots, u_s\}$$

EC 的模型可用下式表示:

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

智能算子 f 为几个算了的复合运算: $f = g \cdot h \cdot p$

其中, $g: E \rightarrow E^*$, $h: E^* \times K \rightarrow I$, $p: I \rightarrow U$

g, h, p 均为智能算子,其基本形式为

IF A THEN B

其中 A 为前提, B 为结论。 A 与 B 之间的关系可以包括解析的非解析的各种表达形式, B 也可以是一个子规则集。

下面分别介绍 EC 各部分的实现方法。

(1) 知识库的建立

知识库(KB)是 ECS 的核心,它存储了关于工业过程控制的专门知识,一般是由数据库的规则库组成。建立知识库的主要问题是有效地表达已获取的知识。根据智能控制的特点,一般采用产生式规则作为知识表达的形式较合适,其基本形式:

IF <Situation> THEN <Conclusion>

这种以过程性知识为中心的产生式表达法具有很强的模块性,每条规则都可以独立地增删和修改,使知识库便于管理,具有较高的灵活性。此外,产生式规则的自然性好(与人的思维形式接近),易于为操作人员所理解,是专家系统中最为普遍的知识表达方式。根据 ECS 的特点,建立 KB 还应注意以下几点:① KB 的规模要小,应具有最低的数据冗余度;② 针对不同信息特征采用不同数据结构,如线性表、数组、串、存储树等。合理的数据结构将对 KB 的操作与维护带来很大的好处;③ KB 应具有较好的可扩展性和可移植性,便于知识库的补充与完善;④ 数据库与规则库的结构应合理,便于搜索和管理,以适应实时推理与决策的需要。

(2) 推理机构的实现

推理机构的主要功能是实现实时推理,故其结构应尽可能简单。一般采用数据驱动的正向推理策略,这对于搜索空间较小的 KB 是比较合适的。对某些在线故障诊断的规则也可采用目标驱动的反向推理策略或双向推理策略,以提高搜索效率。

(3) 特征信息处理器的构造

信息的获取与加工是实现控制的先决条件。特征信息处理器(CIP)的主要作用是信息进行加工、处理和特征抽取,将原始信息转化为便于为知识库和推理机构所利用的特征信息,为实时推理与决策提供依据。构造一个性能良好的 CIP 应从以下几方面着手:① 充分利用系统能采集到的信息。除系统输出 y 和误差 e 外,对系统的输入 R ,控制输出 u ,以及输出和误差的一、二阶导数 $\dot{y}, \dot{y}, \dot{e}, \dot{e}$ 等都应加以利用;② 应选择那些既能反映过程特性又便于获取的信息为特征量,例如误差的极值 e_m ,误差的过零速度 e_s ,以及 $e \cdot \dot{e}, |\dot{e}/e|$ 等,以便正确反映

系统的前期控制效果、当前运行状态和变化趋势；③特征模式的划分和抽取应围绕实时控制、稳定性监控和故障诊断三个方面进行。

构造一个好的CIP需要综合应用信号处理、统计分析、模式识别、人工智能等多方面的技术。

(4) 控制机构的建立

控制机构是EC的直接控制级、对被控过程的各种控制决策通过它付诸实施。如前所述，应把智能控制直接用于运行控制级。EC中的控制机构一般由正常情况下的控制模式子集合 U_c 和异常情况下的控制策略子集 U_d 构成。 U_c 可以用解析关系式描述的各种智能控制算法，也可以是用启发式规则表达的知识基控制模式。例如

$$r_{m1}:e_1^* = \{|e| < \delta_1 \cap |\dot{e}| < \delta_2\} \rightarrow u_{c1} = \{u_n = u_{n-1}\}$$

$$r_{m3}:e_3^* = \{e \cdot \dot{e} \geq 0 \cap e^* \notin e_1^*\} \rightarrow u_{c3} = \{u_n = K_{ps}e + K_i \sum e_i + \gamma K_{is} \dot{y}\}$$

$$r_{m4}:e_4^* = \{e \cdot \dot{e} < 0 \cap |e| > \Delta R\} \rightarrow u_{c4} = \{u_n = K_{pr}\}$$

其中 $e^* = \{e_1^*, e_2^*, \dots, e_n^*\}$ 为CIP所抽取出来的特征模式。

$u_{ci} \in U_c, U_c = \{u_{c1}, u_{c2}, \dots, u_{cn}\}, u_{ci}$ 为EC的当前时刻控制输出。 r_{mi} 为规则的序号。

U_d 包括在线稳定性监控和故障诊断与处理子规则集。EC的故障诊断过程如图3所示。

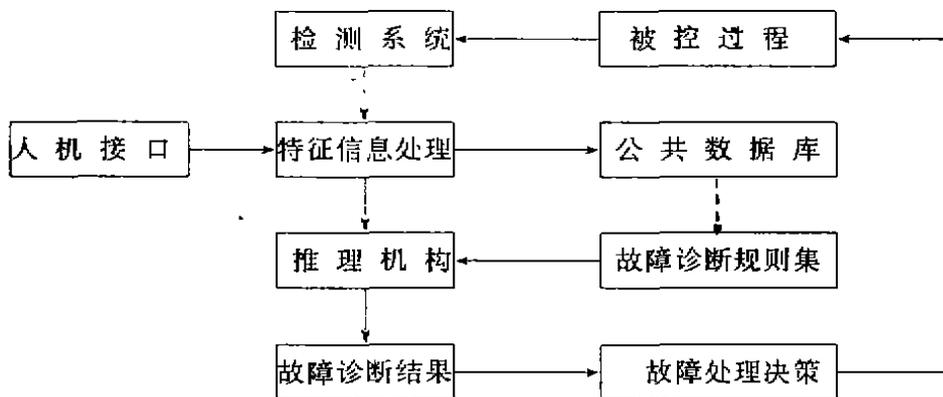


图3 在线故障诊断与处理流程图

当系统发生偶然故障时，推理机构将根据在线抽取的关于故障现象的特征模式和故障诊断规则判断类别与故障源，计算故障发生的置信度，从而推出诊断结果，并给出相应的处理决策。 U_d 中的规则是对这些故障进行实时诊断和处理的基本策略。由于EC的稳定性监控和故障诊断推理过程具有非确定性，故这部分的知识表达形式为：

IF Situation THEN Conclusion WITH CF= α

其中CF为置信度， $\alpha \in [0, 1]$ ， α 的大小反映了定性推理的可信程度。

以上四个部分构成了EC的基本结构。按上述原则和方法设计的ECS结构紧凑，知识的存取、更新和扩充较为方便，较好地解决了智能控制系统结构的复杂性与在线控制的实时性之间的矛盾，便于在工业控制微机上实现，为ECS的工程实用化创造了条件。

3 专家控制系统的工程实现

回转窑是广泛用于冶金、水泥、化工等部门的一类重要的生产设备。由于其传热关系复杂、负荷变化大、干扰因素多、过程特性具有非线性与分布参数性,难于建立准确的数学模型,一直被视为工—过程控制的难题之一。本文以回转窑为实际背景,根据上述设计原则和方法设计出了一个用于工业回转窑的专家控制器(EC),并对其工程实用化作了进一步研究。

在知识获取方面,采用对话式与归纳式学习相结合的方法。由于人工控制的效果因人而异,变化较大,不宜直接模拟。本文将工艺人员对生产过程的要求(即性能指标)和有经验的操作人员的控制经验及现场故障判断与处理经验加以归纳、总结,根据上述专家控制的原理和方法,构成了专家控制器(EC),并采用产生规则作为知识表达的形式。

为了适应工业过程实时控制的需要,EC的结构设计、软件编制及硬件配置上采取了一系列工程实用化措施。由于不考虑推理过程的透明性,EC的知识库只存贮关于回转窑实时控制和常见故障诊断的专门知识,故知识库的规模小。各子规则集均按功能进行分类,子集内的规则条数少,并采用数据驱动的正向推理技术,实现实时推理,整个软件系统采用了自顶向下的结构化程序设计方法,软件系统由二十多个子模块构成。为了实现多回路、多参数实时控制及实时故障检测与诊断,全部软件直接用8088汇编语言实现。这种虽然编程工作量大,但与实现同样功能的高级语言相比,不仅运行速度快,I/O管理方便,而且大大节省了内存空间。EC的全部程序所需内存不到16KB,均固化在一片27128上,开机后只需按下G键即可自动进入EC工作程序,操作简单,运行可靠。在硬件结构上,采用了以8088为CPU的PMC-88工业控制机,模拟量通道采用12位A/D、D/A转换,转换时间为40 μ s。为了适应EC的需要,还对PMC-88微机原监控程序进行了适当的修改。在过程参数的检测、信号的传输与处理方面采取了屏蔽、隔离、接地、模拟及数字滤波等抗干扰措施,保证系统可靠运行。

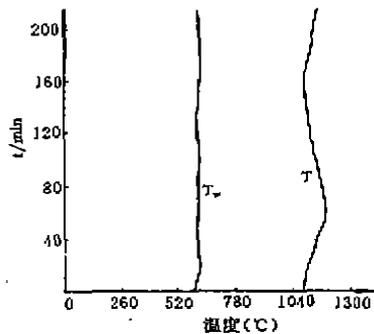


图4 人工控制的温度曲线

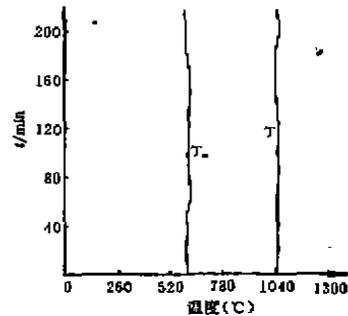


图5 EC控制的温度曲线

本文设计的回转窑专家控制系统已在红矾钠回转窑生产过程中投入实时运行。该系统的调节参数为燃料的压力、流量、空气流量和炉膛压力,系统的主控参数为炉温。同时采用

了氧化锆氧量分析仪对尾气氧含量进行监控。由于炉温与众多因素有关,特别是进料量频繁波动,负荷干扰大,给控制增加了难度。图4为回转窑人工操作的温度曲线,图5为EC控制下的温度曲线。图中 T 为炉温, T_w 为炉尾温度。由于 T_w 对进料量的变化较为敏感,故能较早地反映负荷变化。当进料量增加时, T_w 会随之降低。可以看出,在 T_w 波动不大(即负荷比较平稳)的情况下,人工控制的炉温曲线有较大幅度的波动。而在EC控制下的炉温却能较好地稳定在设定值上。

图6为负荷大幅度变化时在EC控制下的温度曲线。可以看出,进料量波动频繁且幅度大,在 t_1 时刻 T_w 已超过 700°C ,系统已报警,表明出现“断料”情况。EC控制下的炉温波动幅度仍能保持在一个较小的范围内,完全满足工艺要求。

由于EC能使处于频繁干扰下的回转窑保持稳定的工况,为提高产品的产量和质量提供了良好的条件。根据半年多的现场数据统计,EC控制下产品的平均转化率比人工控制增长3%以上,这不仅提高了产品的产量和质量,而且降低了单位产品的能量及原材料消耗,取得了良好的控制效果。

4 结 论

对回转窑专家控制系统的工程应用研究表明,把专家系统技术与计算机控制技术相结合,设计出性能优良,实时性好的专家控制器,是实现复杂工业过程智能控制的一种实用而有效的方法。由于专家控制器在知识表达上的灵活性,只要将知识库的内容和规则作适应的增删、修改,就可用于不同的工业对象。可以预测,随着专家控制的理论和应用的不断发展,这种结构较为简单、易于工程实现而又具有优良控制性能的专家控制器将有着十分广阔的发展前景。本文写作过程中得到周其鉴教授的热情指教和帮助,在此谨向周教授表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- 1 Richard A. Herrd, ON-line Expert Systems and Their Role in the Control Systems of the Future, *ISA Transactions*, 1990, 29(1), 41~46
- 2 陈民铀. 专家式控制器的设计原则及实现方法的研究. *CAA' 88*, 1988, 2, 308~311
- 3 陈民铀. 一种基于模式识别技术的智能控制方法. *模式识别与人工智能*, 1992, 5(3), 229~234
- 4 Zhou Qijian. "The Robustness of An Intelligent Controller And Its Performance". *IEE Conference Publication*, 1985, (252)
- 5 李祖枢. 智能控制理论研究. *信息与控制*, 1991, 20(5), 27~37
- 6 陈民铀, 周其鉴. PH过程的智能控制. *信息与控制*, 1987, 16(2), 1~6

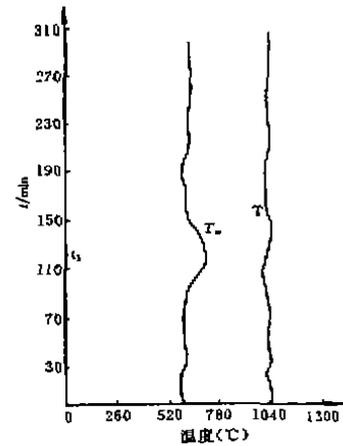


图6 大负荷变化下EC控制的温度曲线