

文章编号: 1001-0920(2004)08-0923-04

## 现场总线系统分布式智能预测控制的实现

张 果, 张云生

(昆明理工大学 信息工程与自动化学院, 云南 昆明 650051)

**摘 要:** 对于采用现场总线系统控制的复杂对象, 应用智能预测控制的方式对其进行分布式控制, 将现场总线的特点与智能预测控制方法相结合, 使各子系统之间的参数以及控制动作协调一致, 以实现对整个系统的优化控制 提出了在现场总线系统中构建该方法的步骤, 并给出了一个采用该控制方法获得较好控制效果的具体实例

**关键词:** 现场总线系统; 分布式预测控制; 智能控制

**中图分类号:** TP18 **文献标识码:** A

## Implementation of distributed intelligent predictive control in fieldbus system

ZHANG Guo, ZHANG Yun-sheng

(Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051, China Correspondent: ZHANG Guo, E-mail: guo-zh@sina.com)

**Abstract** For complex object based upon fieldbus control system, it can be controlled by distributed control with intelligent predictive control The feature of fieldbus system and the method of intelligent predictive control can be integrated correctly, control parameters of every subsystem can be matched, control action among subsystems can be cooperated, and optimal control in system may be implemented An approach to form intelligent predictive control in fieldbus system is presented An application example shows the effectiveness of this method

**Key words:** fieldbus system; distributed predictive control; intelligent control

### 1 引 言

随着现场总线控制系统在生产过程控制中的广泛应用, 系统的风险和可维护性已分散到点一级水平 要获得对复杂对象较好的控制效果, 提高控制效率, 关键在于使现场总线系统中的各种控制动作协调一致 在一些高度复杂的生产过程中, 系统的特性常体现出较为明显的非线性、滞后性和不确定性, 因而难以对整个系统建立完整的数学模型 大量的实验研究发现, 在得到必要的操作训练后, 由人实现的控制方法是接近最优的, 而且该方法的获得并不需要了解对象的结构参数 但是, 由人对复杂系统进行

控制存在一致性和快速性等问题 因此, 本文重点阐述利用分布式预测控制结合智能控制的方法, 产生用于协调现场总线控制系统中各个子系统之间控制动作的控制策略, 并给出一个基于智能预测控制分布式控制的具体实现

### 2 现场总线控制系统的描述

#### 2.1 系统结构

可以认为现场总线控制系统是分布式系统的具体实现 通信网络节点上分布的自治处理单元 (PE), 可看作现场总线控制系统中具有特定控制或监测功能的子系统, 其控制力取决于控制器的设

收稿日期: 2003-09-11; 修回日期: 2003-11-27

基金项目: 云南省自然科学基金重点资助项目 (F200004)

作者简介: 张果 (1976—), 男, 云南昆明人, 讲师, 硕士, 从事计算机控制与信号处理的研究; 张云生 (1948—), 男, 云南昆明人, 教授, 从事计算机实时控制等研究

计档次及其在整个控制系统中所处的地位

在物理实现上,各子系统之间的合作可表现为组合控制中各种控制动作的配合,如机器人装配中各种装配动作的配合;也可表现为分段控制中各段控制指标之间的协调,进而获得总体最优,如本文给出的烟叶叶片复烤过程中各工艺区参数的协调。在逻辑实现上,这种合作还可表现为运行于各子系统的各个进程之间的合作。这些合作的进程可运行在不同的PE上,彼此之间完全独立。合作的进程之间以消息传递的方式进行通信,设计时要考虑子系统完成各自任务的独立性,增强系统对通信中不确定因素的适应性,即鲁棒性。

利用现场总线系统结构所具有的信号协议统一和接口开放等特点,可将系统中的各个子系统有效地分布连接,从而使各子系统的控制既分布又相互支持,为获得整个系统的最优控制提供可能。

## 2.2 预测控制问题描述

预测控制基于控制模型,控制决策 $u(k)$ 在均匀间隔的离散时刻 $k(k=0,1,\dots)$ 产生。在决策时刻 $k$ ,控制器可采样系统状态 $x(k)$ ,通过求解如下形式的最优化问题:

$$M \text{ in } J(X(k), U(k)), \quad (1)$$

形成控制动作。此处

$$X(k) = \{x(k+1|k), \dots, x(k+N|k)\},$$

$$U(k) = \{u(k|k), \dots, u(k+N-1|k)\}.$$

约束条件为

$$x(k+i+1|k) = F(x(k+i|k), u(k+i|k)), \\ i = 0, 1, \dots, N-1;$$

$$G(X(k), U(k)) = 0, x(k|k) = x(k).$$

式中:性能指标表示预测的控制行为与期望的控制行为之间的误差,其值越低性能越好;变量 $x(k+i|k)$ 和 $u(k+i|k)$ 分别是基于 $k$ 时刻信息所产生的 $k+i$ 时刻的预测状态和预测控制。预测基于系统模型 $x(k+1) = F(x(k), u(k))$ ,同时将系统的物理限制以及确保系统稳定性或鲁棒性的条件作为约束。利用最优化可产生一个开环最优控制序列,该序列中第1个值 $u(k) = u(k|k)$ 施加到系统中,控制器等待下一个控制时刻,并重复此过程,以找到下一个控制动作。

对于复杂系统,统一建模非常困难,若将整个系统划分为若干子系统,则可将上述最优化问题相应地分解为一系列的最优化子问题集 $\{SP_k | k=0, 1, \dots\}$ ,它们具有如下形式<sup>[2]</sup>:

$$SP_k: M \text{ in } J_i(V). \quad (2)$$

其中 $V$ 是决策变量向量(包含状态变量 $X$ 和控制变量 $U$ )。用最优化子问题描述系统中某个子系统的控制目标,将整个系统最优化问题的求解转化为对各个最优化子问题的求解,通过求出各个最优化子问题 $SP_k$ 的解,进而找到整个系统的最优解。等价约束可表示为 $G(V) = 0, H(V) = 0$ 。

一个关键的问题是子问题的最优解集合是否构成整个现场总线控制系统的最优解。此问题的解决直接与分布式控制系统中各子系统控制动作是否协调密切相关。与一般的基于模型的预测控制不同,在现场总线控制系统中进行预测控制时,除考虑滞后时间这一因素外,还应考虑现场总线控制系统中各个子系统间控制动作的相互影响。第 $i$ 个子系统的预测可表示为

$$x_i(k+1) = \Psi(\Theta_{ij}x_j(k), \lambda_{ij}u_j(k)), \\ j = 0, 1, \dots \quad (3)$$

$x_i(k+1)$ 除与第 $i$ 个子系统 $x_i(k), u_i(k)$ 有关外,还与其他子系统的预测和控制 $\{x_1(k), \dots, x_{i-1}(k), x_{i+1}(k), \dots, u_1(k), \dots, u_{i-1}(k), u_{i+1}(k), \dots\}$ 有关,各子系统之间的关系取决于系数 $\Theta_{ij}$ 和 $\lambda_{ij}$ ( $\Theta_{ij}$ 表示 $x_i(k)$ 与 $x_j(k)$ 相关性,  $\lambda_{ij}$ 表示 $x_i(k)$ 与 $u_j(k)$ 相关性),且有 $0 < \Theta_{ij} < 1, 0 < \lambda_{ij} < 1$ 。当 $i=j$ 时,取 $\Theta_{ij} = 1, \lambda_{ij} = 1$ 。整个系统的最优控制序列可描述为

$$U(k) = \{u_1(k|k), \dots, u_1(k+N-1|k), \dots, \\ u_i(k|k), \dots, u_i(k+N-1|k), \dots\}.$$

此控制序列中第 $i$ 个子系统的第1个值为 $u_i(k) = u_i(k|k)$ 。

根据上述对现场总线系统中预测控制的描述可知,难以建模且滞后较大的复杂生产过程可划分为若干具有相对明确模型的子系统。首先对各个子系统实施分布式控制;然后通过实现各子系统控制的协调来达到对整个系统的有效控制。这种协调不改变各子系统的控制规律,也不改变系统的分布式特点。例如,针对分段加热的大热容滞后系统,除考虑系统的滞后性对控制的影响需要进行预测外,还可根据生产流程中靠前的子系统所表现出的动态特性预测其后子系统的动态特性,从而针对系统的控制目标提出有预见性的控制决策。下面提出的智能预测控制方法,可为系统的预测行为提供参考依据,在预测时还可根据系统的约束对产生的控制策略进行合理筛选,提高各子系统控制动作的协调性。

## 3 智能预测控制

本文讨论的智能预测控制是在控制过程中利用计算机模拟人的控制行为,根据系统的动态过程

所提供的特征信息进行预测, 对现场总线控制系统中各子系统(这些子系统具有相对明确的数学模型)的控制动作进行协调

### 3.1 智能控制的特征变量<sup>[2-4]</sup>

利用计算机进行智能预测控制, 需用一些变量描述控制系统的动态特征。在模糊控制中, 选用误差  $E$  和误差变化率  $\Delta E$  作为模糊控制器的输入变量, 而模糊控制器的输出可表示为

$$y = f(E, \Delta E). \quad (4)$$

误差  $E$  用于确定系统是否需要调整, 其值决定系统输出偏离设定值的程度以及需要调节的方向。对于复杂系统, 如果只根据误差  $E$  的大小进行控制, 则很难得到满意的控制效果, 因而还需选用误差变化率  $\Delta E$ 。利用误差变化率  $\Delta E$  可对误差  $E$  的变化快慢及方向进行预测, 减少控制作用的滞后时间, 使控制效果更好。针对图 1 所示的系统动态曲线, 利用基本变量误差  $E$  和误差变化率  $\Delta E$  进行讨论。由表 1 可获得更多的特征信息, 并根据这些信息设计智能预测控制器。误差  $E$  和误差变化率  $\Delta E$  离散化为误差  $E_n$  和误差变化  $\Delta E_n$ ,  $n$  为时刻

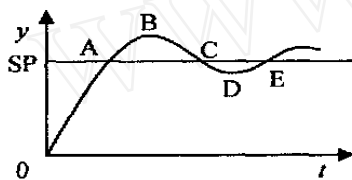


图 1 系统动态过程

表 1 特征变量符号变化情况

	OA 段	AB 段	BC 段	CD 段	DE 段
$E_n$	> 0	< 0	< 0	> 0	> 0
$\Delta E_n$	< 0	< 0	> 0	> 0	< 0
$E_n \Delta E_n$	< 0	> 0	< 0	> 0	< 0

1)  $E_n \Delta E_n$ : 当  $E_n \Delta E_n < 0$  时, 表明系统动态过程正向误差绝对值减小的方向变化, 如 BC 段和 DE 段; 当  $E_n \Delta E_n > 0$  时, 表明系统动态过程正向误差绝对值增加的方向变化, 如 AB 段和 CD 段

2)  $\Delta E_n \Delta E_{n-1}$ :  $\Delta E_n \Delta E_{n-1} < 0$  表示出现极值, 而  $\Delta E_n \Delta E_{n-1} > 0$  表示无极值。将  $\Delta E_n \Delta E_{n-1}$  与  $E_n \Delta E_n$  相结合, 以判断极值出现后误差变化的趋势

3)  $\Delta(\Delta E_n)$ :  $\Delta(\Delta E_n)$  表示误差变化的变化率, 即二次差分。  $\Delta(\Delta E_n) > 0$  表示系统动态过程处于超调段, 如 ABC 段;  $\Delta(\Delta E_n) < 0$  表示系统动态过程处于回调段, 如 CDE 段

### 3.2 智能预测控制算法设计

智能预测控制算法的设计是利用信息库(知识库)中的有效信息为控制系统建立规则库。信息库中的信息来自各个子系统, 这些数据包括各控制级 PE 的控制参数以及各传感单元的检测数据和各执行机构的电气性能等, 其内容可被任何规则访问。规则库是作用于信息库上的规则的集合, 它是协调级 PE 选择控制策略的依据, 某个控制策略的产生意味着一条或多条规则的实现。每条规则均具有相同的格式: “If ... Then ...”, 接近于人的思维模式。若知识库中的信息满足某条规则的条件, 此规则便被调用, 而这条规则的执行又可能修改信息库中的信息。智能预测控制系统的任务是提取控制规则, 选择控制策略, 并预测下一步可能会使用的规则

显然, 可以有选择地利用上述系统特征变量  $E_n, \Delta E_n, E_n \Delta E_n, \Delta E_n \Delta E_{n-1}$  等, 结合系统的控制目标, 为处于协调级的 PE 建立规则库

Step 1: 综合考虑系统整体动态特性, 选择恰当的特征变量, 产生特征变量集合或特征变量关系集合

$$V = \{V_1, V_2, \dots, V_i, \dots\}. \quad (5)$$

其中  $V_i$  表示由第  $i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) 个控制级 PE 提供的特征变量子集或特征变量关系子集

Step 2: 考虑各控制级 PE 的控制动作, 产生控制动作集合

$$W = \{W_1, W_2, \dots, W_i, \dots\}. \quad (6)$$

其中  $W_i$  表示在第  $i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) 个控制级 PE 上执行的控制动作子集

Step 3: 根据产生式规则, 形成规则集合

$$R = \{R_1, R_2, \dots, R_k, \dots\}. \quad (7)$$

$R_k$  ( $k = 1, \dots, m$ ) 表示规则集合中的一条规则,  $m$  为规则库中允许的最大规则数;  $R_k$  可以表达为: “If ( $S_i$ ) Then ( $H_j$ )”,  $S_i$  可以是集合  $V$  中  $i$  个子集的有条件组合,  $H_j$  可以是集合  $W$  中  $j$  个子集的有条件组合, 条件为实际领域中的物理约束

## 4 分布式智能预测控制实例

叶片复烤机是一个复杂的热容滞后系统(分为 3 段 7 个工艺区), 难以建立统一的数学模型, 但采用现场总线控制系统可对其进行分布式控制。系统中的各控制级 PE 按工艺分区域建立, 均按模型进行 PD 控制, 协调各控制级 PE 的参数以及控制动作是提高控制效果的关键

选取入口水分误差  $E_1$  和误差变化率  $\Delta E_1$ , 中部水分误差  $E_2$  和误差变化率  $\Delta E_2$ , 出口水分误差  $E_3$  和误差变化率  $\Delta E_3$  作为特征变量。通过调整各控制级

PE 的温度设定值来协调它们的控制动作, 目标是使  $E_3$  的值在规定范围内 根据操作员的经验, 可提取智能预测控制规则, 如表 2 所示 其中: (+) 表示温度设定值增加, (-) 表示温度设定值减少; I 表示干燥 1 区和 2 区温度; II 表示干燥 3 区和 4 区温度; III 表示回潮 1 区温度; IV 表示回潮 2 区温度

表 2 智能预测控制规则

	$E_1(+)$	$E_1(-)$	$E_2(+)$	$E_2(-)$	$E_3(+)$	$E_3(-)$
$\Delta E_1(+)$	II(+)		I(+)		IV(+)	
$\Delta E_1(-)$		II(-)		I(-)		IV(-)
$\Delta E_2(+)$			I(++)	I(-)	II(+)	
$\Delta E_2(-)$			I(+)	I(-)		II(-)
$\Delta E_3(+)$					III(++)	III(-)
$\Delta E_3(-)$					III(+)	III(-)

以往对叶片复烤机的控制, 主要依赖于操作员根据工作经验在线手动调整各工艺分区的控制参数, 实现各工艺分区的温度协调 其缺点是各控制级 PE 的控制参数调整主要依赖人工设定和修改, 难以协调控制动作, 一致性差; 主要控制指标(出口水分)对各控制级 PE 控制动作的参考作用有限; 对各工艺分区温度的调整未考虑入口水分和中部水分, 滞后明显

应用分布式智能预测控制方法后, 协调级的 PE 根据各水分指标选取相应控制规则, 自动调整各控制级 PE 的控制参数, 控制动作的协调得以实现,

一致性好; 主要控制指标(出口水分)的参考作用得以发挥, 各 PD 环设定值整定合理准确; 充分考虑入口水分和中部水分在控制中的预测作用, 减弱了热容滞后对控制效果的影响 该控制方法已应用于云南红河卷烟厂复烤厂叶片复烤机的控制, 并获得了较好的控制效果

## 5 结 语

对于难以整体建模的复杂系统, 常采用现场总线系统结合分区域控制 可选择恰当的系统特征变量作为规划控制策略的依据, 根据智能预测控制方法将各子系统的控制动作协调起来, 以实现全局的优化控制 烟叶叶片复烤过程控制系统的设计与实现, 证明了本文提出的分布式智能预测控制方法具有较好的应用效果

## 参考文献(References):

- [1] Eduardo Camponogara, Dong Jia, Bruce H Krogh, et al Distributed model predictive control [J]. *IEEE Control System Magazine*, 2002, 22(1): 44-52
- [2] 李士勇 模糊控制·神经控制和智能控制论[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1998
- [3] 傅京孙, 蔡自兴, 徐光佑 人工智能及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1987
- [4] 周其鉴 仿人智能控制器[J]. *中国仪器仪表*, 1993, (2): 5-9  
(Zhou Q J. Human simulation intelligent controller[J]. *China Instrumentation*, 1993, (2): 5-9.)

(上接第 914 页)

## 6 结 语

本文根据飞行试验中常用的有关模型简化方法, 分析了飞行器运动方程, 并给出了分段线性化模型簇描述 在实际中, 可通过一系列飞行试验和气动参数辨识方法得到该模型簇 为了简化设计并减少控制器个数, 可选定某些给定飞行高度、马赫数设计控制器, 利用式(11)或(12)检验对角占优势来检查该飞行区域的鲁棒稳定性 这样, 在全飞行区域(飞行包线)内, 可以选取多个子系统构成全系统的鲁棒镇定控制器 对于飞行器的建模误差, 可采用输入补偿方法抑制误差 本文方法计算简单, 可以降低飞行控制器设计的复杂度 但也存在常规鲁棒控制设计方法的保守性问题

## 参考文献(References):

- [1] Gad-el-Hak M. Micro-air-vehicles: Can they be controlled better[J]? *J of Aircraft*, 2001, 38(3): 419-429
- [2] Kwakernaak H. Robust Control and  $H_\infty$  optimization-tutorial Paper[J]. *Automatica*, 1993, 29(2): 255-273
- [3] Kenney, C. S. Numerical integration of the differential matrix Riccati equation[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1985, AC-30(10): 962-970
- [4] Yaakov O. Eigenfactor solution of the matrix Riccati equation—a continuous square root algorithm[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1985, AC-30(10): 971-979
- [5] 程云鹏, 徐仲, 张凯院 矩阵论[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2000