

文章编号: 1004-0609(2003)06-1546-04

稳定控制理论在阳极焙烧炉中的应用^①

郭 戈, 袁占亭, 李战明

(兰州理工大学 电气工程与信息工程学院, 兰州 730050)

摘 要: 为对阳极焙烧炉温实施准确控制, 将无源性理论与过程控制相结合, 根据热力学消耗特性以及系统建模领域的行为性方法设计稳定的控制器。控制点的设置采用分布式结构, 不同控制点的控制策略具有相同的结构, 同时考虑时间和空间上的分布特性。仿真实验以已有的焙烧炉温度场模型为基础, 动态地为各个控制点提供设定值, 结果表明该方法可以非常有效地实现焙烧炉温度的有效控制。

关键词: 阳极焙烧; 温度控制; 分布式系统; 过程控制

中图分类号: TP 273

文献标识码: A

阳极焙烧过程及其环境非常复杂, 且燃料中含有杂质, 因而燃烧过程很不平稳, 这使得焙烧过程的动态特性不断变化, 难以准确测量和控制。焙烧过程实际上分为两个阶段: 第一阶段指从燃烧架喷出的燃料的燃烧过程; 第二阶段指燃烧架移开之后阳极块中的沥青的燃烧过程。这两个阶段的炉室温度都需要控制, 其效果都对阳极块的性能有较大影响。这种分布参数系统的共同特点是其受控参数在时间和空间上具有分布特性, 难以用传统的方法进行有效的建模和控制。另外, 系统中存在严重的时变非线性特性、大惯性特性和未知因素的干扰。所以, 研究人员目前只采用传热学等知识得到了各种不同的阳极焙烧炉温度场数学模型, 并据此进行数值仿真和结构优化^[1-3], 而关于焙烧炉温度控制策略的研究还处于起步阶段。

分布参数系统控制理论的研究已经成为现代控制理论的一个热点研究领域。1971 年, Lions 最早提出了分布参数系统最优控制理论^[4], 后来有许多学者进一步发展了分布参数系统控制理论^[5-6], 提出了线性分布参数系统的反馈控制方法。关于分布参数系统控制技术在工业过程中的应用研究主要集中在化学、铝加工、玻璃制造以及水泥炉窑等过程方面^[7, 8]。总的来看, 现有的分布参数系统控制理论和方法大都以状态空间方程模型为基础, 其中对于稳定性和能量消耗特性的概念都是用代数方程来描述的, 对于阳极焙烧过程温度控制这样的复杂问

题来说, 这种方法不够准确。

数学系统理论中最普遍且最重要的稳定性理论指出: 一个无源系统和一个严格无源系统通过反馈而构成的系统是渐近稳定的。对于焙烧过程第一阶段的温度控制, 可直接采用已有的分布式 PID 控制方法^[9]。本文作者主要研究焙烧过程中的第二阶段温度控制问题, 在控制点的设置上采用分布式结构, 并在各控制点的控制策略中考虑系统在时间上的分布特性, 将无源性理论与过程控制相结合, 并根据热力学消耗特性以及系统建模领域的行为方法设计稳定的控制器, 成功地解决了阳极焙烧炉温度控制这一制约阳极产品质量的关键问题。

1 数学基础

首先给出无源性定义: 对于空间 P 上具有光滑边界 B 的过程系统, 其输入、输出和内部状态分别为 u 、 y 和 z , 如果存在非负常数 β 和函数 $V: z \rightarrow R^+$, 满足下述关系:

$$V(z(t)) - V(z(0)) \leq \int_0^t \langle y, u \rangle_B ds - \beta \int_0^t \|z\|_{L_2(P; R^n)}^2 ds \quad (t < \infty) \quad (1)$$

式中 s 为熵密度。

如果 $V(0) = 0$, 则称该过程系统为无源系统。如果进而有 $\beta > 0$, 则此过程系统为严格无源系统, 且称 $V(z) = 0$ 的状态为无源状态, 内积 $\langle \cdot, \cdot \rangle$

① 基金项目: 国家科技攻关项目(2002BA901A28)、甘肃省省长基金项目(GS015-A52-012)

收稿日期: 2002-11-15; 修订日期: 2003-02-20

作者简介: 郭 戈(1972-), 男, 教授, 博士。

通讯联系人: 郭 戈, 教授, 博士; 电话: 0931-2806901; E-mail: geguo2003@yahoo.com.cn

$= \langle y, u \rangle_B$ 称为能量供给率。

根据上述定义, 无源系统可提供的能量取决于它起初所存储的能量(即供给能量与消耗能量之差)。这与热力学第二定律相似, 即系统的熵总是大于或等于初始熵与供给熵之和。另外, 对于严格无源系统, 如果其 u 或 y 为零时, 状态 z 可收敛到一个无源状态, 则称该系统为稳定系统, 且它一定可逆。状态的收敛速率取决于常数 β , β 越大, 系统收敛越快, 因而越容易控制。可见, 对于严格无源分布参数系统, 其测量和控制结构的选择应当保证映射 $u \rightarrow y$ 严格无源, 且系统未受控动态的收敛速率尽可能大。

为了保证分布参数系统的稳定性, 同时也为了得到与过程系统自身无源性直接相关联的控制策略, 文献[10]根据不可逆热力学原理中的构成关系和歧异定理, 利用内涵变量和外延变量的概念, 提出了一种基于 Onsager-Casimir 传输矩阵^[10]和 Lagrange 算子的分布参数系统控制方法。这种方法能够保证控制系统渐近逼近平衡点, 即保证受控系统的闭环渐近稳定性。因此, 以这种方法为基础, 可以实现阳极焙烧炉温度的准确控制。

2 控制器设计

当燃烧架移开之后, 阳极块的焙烧主要是靠其中的沥青的燃烧反应来实现的, 炉道内部能量关系满足无源性, 根据热物理学知识, 此时同一排炉道的内部能量平衡关系可以写为

$$\frac{\partial l}{\partial t} = \frac{\partial f}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

式中 x 为炉道深度, t 为时间, l 为炉道内部能量密度, f 为炉道内的热通量。假设焙烧炉和阳极块的体积膨胀可以忽略, 则上述方程的边界条件为

$$\begin{cases} T = T_L & (x = L^+) \\ T = T_0 & (x = 0^-) \end{cases} \quad (3)$$

式中 L 为炉道深度, T 为炉道内的温度。且炉道上下两端的热流可由下式给出:

$$\begin{cases} f_0 \cdot n = k_0(T(0, t) - T_0(t)) \\ f_L \cdot n = k_L(T(L, t) - T_L(t)) \end{cases} \quad (4)$$

根据正则化定义可知: 当 $x = 0$ 时, $n = 1$; $x = L$ 时, $n = -1$ 。由于热阻 k_0 和 k_L 可变, 将其当作增益处理。

根据无源性理论和消耗理论^[10]而设计的渐近稳定温度控制器, 定义凸外延变量如下:

$$\varepsilon = T_0 \cdot s(l) \quad (5)$$

式中 T_0 为某任意选取的焙烧炉燃烧室参考温度, $s(l)$ 为炉道内的熵密度。根据 Callen 理论^[10]有如下内涵变量

$$\omega = - \frac{\partial s}{\partial l} = - T_0 \cdot \frac{1}{T} \quad (6)$$

取焙烧炉壁及阳极块的比定容热容均为常数 $c_V = \frac{\partial l}{\partial T}$, 且由热力学第二定律可知, 热能总是由热体流向冷体, 即 $c_V > 0$, 故而有

$$M = \frac{\partial \omega}{\partial l} = \frac{T_0}{T^2} \cdot \frac{\partial T}{\partial l} = \frac{T_0}{T^2} \cdot \frac{1}{c_V} > 0 \quad (7)$$

式(7)保证了外延 $\varepsilon(l)$ 的凸性。另外, 若

$$d\omega = M dl \quad (8)$$

则通过积分就可以得到外延变量 T 与内涵变量 l 之间的差分关系:

$$- T_0 \left[\frac{1}{T} - \frac{1}{T^*} \right] = Q(l - l^*) \quad (9)$$

式中

$$Q = \int_0^l \frac{T_0}{T^2} \cdot \frac{1}{c_V} \cdot d\varepsilon > 0 \quad (10)$$

于是, 根据阳极焙烧炉理论焙烧曲线选取炉室内的静态参考温度 $T^*(x)$, 并根据有效存储能量守恒定律可以得到:

$$\begin{aligned} & A(t) + T_0 \left[\frac{1}{T^*(0)} - \frac{1}{T(0, t)} \right] \bar{f}_0 - \\ & T_0 \left[\frac{1}{T^*(L)} - \frac{1}{T(L, t)} \right] \bar{f}_L = \int_0^L X \bar{f} dP \end{aligned} \quad (11)$$

式中 X 为焙烧炉室中的热力向量; $\bar{f} = f - f^*$, f^* 为某个任选的热通量; $A(t) = \int_0^L a(z(t)) dP \geq 0$ 称为焙烧炉温度系统的总有效存储能量, $a(z(t))$ 为热状态 z 所对应的有效存储能量^[10]。如果将系统的输出选为

$$y = \begin{bmatrix} T_0 \left[\frac{1}{T^*(0)} - \frac{1}{T(0, t)} \right] \\ T_0 \left[\frac{1}{T^*(L)} - \frac{1}{T(L, t)} \right] \end{bmatrix} \quad (12)$$

输入选为

$$u = \begin{bmatrix} \bar{f}_0 \\ -\bar{f}_L \end{bmatrix} \quad (13)$$

则通过积分可得:

$$A(t) - A(0) + \int_0^t u^T y ds = \int_0^L X \bar{f} dx \quad (14)$$

由于可以证明上式右侧非正, 因此映射 $u \rightarrow y$ 具有无源性。根据 Desoer 理论^[10], 可对阳极焙烧炉温度控制系统设计如下控制器:

$$u = -k_c y \quad (15)$$

式中 k_c 为由比例增益构成的对角阵。

该控制律也可以用具体的物理变量表示为

$$f_i = f_i^* - k_{ci} \left[\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_i^*} \right] \quad (16)$$

或

$$f_i = f_i^* - \frac{k_{ci}}{T_i T_i^*} (T_i^* - T_i) \quad (17)$$

式中 $i = 0, 1$; T_i 为炉道上下两端的温度 $T(0, t)$ 或 $T(L, t)$; T_i^* 代表炉道上下两端的参考温度 $T^*(0)$ 或 $T^*(L)$ 。

由于控制律为标准的温度偏差控制律, 且阳极焙烧炉温度控制系统严格无源, 因此有如下两个重要结论:

1) 可采用积分和微分作用来减小焙烧温度的稳态偏差, 并改善温度的瞬态响应性能, 即可以设计如下形式的 PID 控制器:

$$f_i = k_{ci} \left[y + \frac{1}{t_i} \int_0^t y ds + t_D \frac{dy}{dt} \right] \quad (18)$$

2) 可利用热消耗效应来抵消非消耗效应(如焙烧过程中的化学反应)的影响。

3 实验与结论

仿真实验是在 Windows 98 环境下进行的, 取最高焙烧温度为 1 234 °C, 各阶段的升温速率按照工艺要求分别取为 $k_1 = 9.56$ °C/h, $k_2 = 7.06$ °C/h, $k_3 = 4.56$ °C/h, $k_{21} = 6.74$ °C/h, $k_5 = 8.93$ °C/h, $k_6 = 10.02$ °C/h, $k_7 = 11.11$ °C/h, $k_8 = 5.56$ °C/h 和 $k_9 = 0$ °C/h, 并采用厂方要求的 180 h 升温曲线。仿真实验中将 1 个燃烧室作为 1 个整体解析空间考虑, 并根据工艺要求取 3 个燃烧架入口流量相等, 重油入口压力为 2.6 kPa, 入口流量为 0.058 m³/s, 入口温度取为 25 °C, 重油燃烧值取为 4.568 × 10⁶ J/m³, 焙烧炉壁的温度按第三类边界条件处理。焙烧过程仿真模型采用文献[2]中的动态模型, 将一个炉室分为 10 888 个网格, 用混合差分法离散控制方程求解该模型。所得的焙烧过程温度计算结果如图 1 所示。从图中可以看出, 仿真实验中的焙烧温度很好地按照工艺要求的升温曲线变化, 整个焙烧过程, 升温曲线非常平稳, 没有出现异常温度值, 绝大部分的温度偏差都在 ±1 °C 之内, 远小于工艺要求的偏差值。即使在升温过程的几个过渡点附近, 温度偏差也比较小, 且持续时间较短, 最大偏差出现在点火初期和保温初期, 原因是由于升温速率发生了较大变化, 而阳极块升温惯性很大, 所

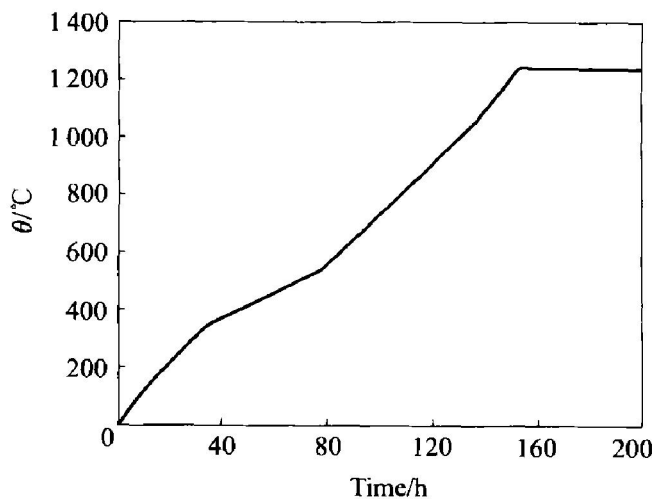


图 1 温度控制仿真结果

Fig. 1 Simulation result of temperature control

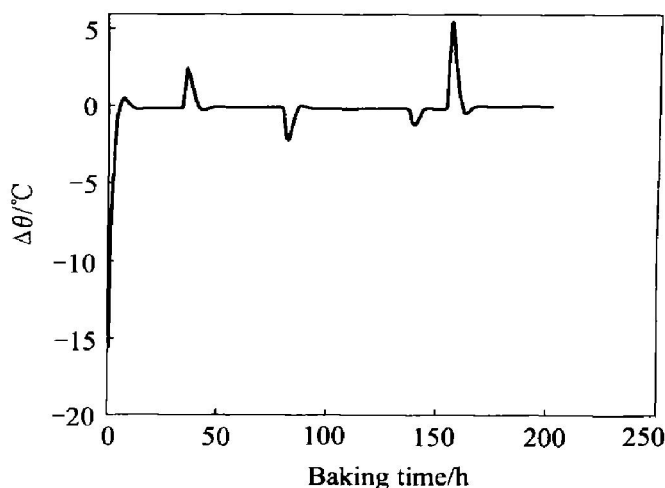


图 2 温度误差

Fig. 2 Temperature error

以导致较大的温度偏差。其它过渡点附近由于升温速率变化不太大, 因而温度偏差都在 ±5 °C 以内。

该厂原有的阳极焙烧炉温度控制偏差高达 ±50 °C, 炉室上下端温差更是达到 200 °C。1996 年 9 月至 12 月外观抽检表明, 熟阳极块裂纹及变形率为 7.82%, 且在电解过程中掉渣、开裂现象较多, 阳极毛耗达 594 kg/t。该项目立项时厂方提出的温度控制精度设计指标为 ±10 °C。图 2 为仿真实验中焙烧炉某测温点的温度控制误差曲线。由图可以看出: 进行焙烧过程温度控制时, 控制效果非常好; 各升温段的温度与设定的温度非常吻合; 除几个过渡点之外, 各平稳加热段的温度偏差都控制在 ±1 °C 之内; 整体阳极焙烧温度提高了 14 °C, 炉室内温度分布非常均匀; 几个较大温度偏差都出现在升温速率过渡点附近, 且升温速率变化越大, 温度误差也因阳极块的热惯性而越大。

实验表明: 用这种方法设计的阳极焙烧炉温度控制策略非常有效, 可以大大改善阳极焙烧温度控制系统的稳态和瞬态性能。

REFERENCES

- [1] Thibault M A. Simulation the dynamics of the anode baking ring furnace[J]. *Light Metals*, 1985 : 1144 - 1149.
- [2] 梅 炽. 阳极焙烧炉燃烧室三场动态仿真[J]. *中南工业大学学报*, 1998, 29(5): 438 - 442.
MEI Chi. Dynamic simulation of anode baking furnace flue[J]. *Journal of Central South University of Technology*, 1998, 29(5): 438 - 442.
- [3] 李欣峰. 阳极焙烧炉结构仿真与优化[J]. *中国有色金属学报*, 2000, 10(2): 282.
LI Xin-feng. Structure simulation and optimization of anode baking furnace[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2000, 10(2): 282 - 286.
- [4] Lions J L. Optimal Control of Systems Described by Partial Differential Equations[M]. Berlin: Springer, 1971. 53 - 107.
- [5] Curtain R F, Zwart H J. An Introduction to Linear Infinite Dimensional Systems[M]. New York: Springer, 1995. 74 - 98.
- [6] Russell D L. Controllability and stability of partial differential equations[J]. *SIAM Review*, 1978, 20: 639 - 739.
- [7] Ray W H. Some recent applications of distributed parameter systems theory-a survey[J]. *Automatica*, 1978, 14(2): 281 - 278.
- [8] Christofides P D. Nonlinear and Robust Control of PDE Systems[M]. Boston: Birkhauser, 2000. 26 - 89.
- [9] Farschman C A. Process systems and decentralized PID control[J]. *Automatica*, 2000, 36: 1642 - 1647.
- [10] Callen H B. Thermodynamics and Introduction to Thermostatistics[M]. New York: Wiley, 1985. 41 - 106.

Application of stable control theory to anode baking kiln

GUO Ge, YUAN Zhan-ting, LI Zhan-ming

(College of Electrical and Information Engineering,

Lanzhou University of Science and Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Consumption properties of thermodynamics and the behavioral approach to system modeling were used to derive a new stable controller design procedure, in which the passivity theory and process control theory were combined. The controlled points were arranged in a distribution structure. Different points were controlled by the same schedule, and at the same time, the system distribution properties in time and space were considered. Simulation experiments were based on the known thermodynamic model which dynamically provides the set-points for different control loops. The results show good performance of this method for controlling the system of anode baking kiln.

Key words: anode baking; temperature control; distribution system; process control

(编辑 李艳红)