

文章编号: 1001-0920(2003)03-0340-03

基于系统辨识的锡真空脱铅炉的建模与优化控制

何 宁¹, 张光辉², 王树青¹

(1. 浙江大学 工业控制技术国家重点实验室, 浙江 杭州 310027;

2. 昆明理工大学 信息工程与自动化学院, 云南 昆明 650093)

摘要: 利用系统辨识的方法, 根据工业现场数据, 建立了真空脱铅炉的数学模型。并在此基础上, 设计了一种前馈比例积分最优控制律, 给出了真空炉最优入炉电功率。仿真结果表明了该方法的有效性和优越性。

关键词: 真空脱铅炉; 系统辨识; 数学模型; 最优控制

中图分类号: TP273 文献标识码: A

Modeling and optimal control based on system identification for the tin vacuum removing Pb furnace

HE Ning¹, ZHANG Guang-hui², WANG Shu-qing¹

(1. National Laboratory of Industrial Control Technology, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. School of Information and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: The mathematic model with system identification based on the data of practically industrial product process is developed for the vacuum removing Pb furnace. Then the feed-forward proportion integration optimal control law is proposed and the best electric power supply is designed. The simulation results show the effectiveness and advantage of the approach.

Key words: Vacuum removing Pb furnace; System identification; Mathematic model; Optimal control

1 引 言

内热式多级连续焊锡(指锡中混有少量的铅)真空脱铅炉是冶金工业分离二元合金的有效设备。其工作原理是依据锡铅合金在一定真空度下的蒸汽压不同, 采用真空蒸馏法进行锡铅二元合金的分离。与以往常压冶金的电解法相比, 真空蒸馏法具有金属回收率高、绝对损失小、污染小等特点^[1]。但通过对 10 t/d 真空炉生产工况的分析, 发现还存在许多问题, 如处理能力不达标、能耗高、炉寿短、凭经验操作等。由于真空炉自动化水平低, 仍处于依靠人工经验操作的水平, 有关生产过程的许多重要参数均为未

知的, 而这些参数直接影响到产品的质量、产量及生产成本的高低。另外, 由于仅凭人工经验操作, 使得该炉运行状况很不稳定, 又因控制手段落后, 使真空炉不能发挥其应有的优势。

由于真空炉是一密闭装置, 无法观察其内部工作过程, 且实际工况较为复杂多变, 真空炉的具体情况又不允许进行反复试验, 因此对真空炉的优化控制问题一直未能得到很好解决。若按其运行机理建立模型, 将是一高阶非线性方程组^[2], 这对于建模和得到最优控制方案是非常困难的。鉴于此, 在 Matlab 平台上, 本文采用系统辨识方法找出一个既简

收稿日期: 2001-12-21; 修回日期: 2002-01-29。

作者简介: 何宁(1972—), 女, 四川蓬安人, 博士生, 从事工业生产优化控制、智能信息系统等研究; 王树青(1939—), 男, 浙江仙居人, 教授, 博士生导师, 从事自动控制理论及应用、工业生产过程模型化与优化控制等研究。

单又能恰当描述该系统特征的数学模型, 并在此基础上实现优化控制。

2 真空炉生产过程

真空炉是一个 21 级垂直叠堆的内热边冷式结构。其中心为一石墨电柱, 通电后石墨电柱发热, 以辐射传热方式加热石墨蒸发盘内的焊锡溶液。在一定的真空度下, 锡铅蒸汽压相差很大, 当温度达到铅的沸点时, 合金液中的铅蒸发分子不断脱离蒸发盘达到冷凝罩上, 凝结为液态铅, 汇入集铅盘, 经与之相连的粗铅管排出炉外, 作为粗铅产品。而在同样温度下, 锡蒸发量很小, 这样到达末级蒸发盘时, 合金液中铅含量将大大下降, 溶液主要为锡溶液, 经与之相连的粗锡管排出炉体, 作为粗锡产品^[1]。

3 数学模型的建立

3.1 变量的选取与数据预处理

分析焊锡真空炉的生产工艺过程, 发现影响它的参数相对较多, 因而对工艺过程参数的选取和预处理是不可避免的。在建立过程数学模型前, 首先分析生产现场台帐记录的各种参数: 入炉电功率 P 、入料量 F 、入料中的含铅量 A_x 、输出粗铅量 F_{pb} 、输出粗锡量 F_{sn} 、粗锡中的含铅量 $A_{pb}\%$ 、真空度 G 、入料温度 T 等。其中输入变量为进料量 $F(A_x, T)$ 和入炉电功率 P ; 输出变量为粗锡量 $F_{sn}(A_{pb}\%)$ 和粗铅量 F_{pb} 。对同一批原料而言, A_x 为一定常值, 无需进行检测。焊锡在入炉前, 必须经熔化锅熔化, 可将熔化锅设计为一温度自控系统, 这样可控制焊锡溶液的温度 T 在某一恒定值上 ($\sim 350\text{C}$)。从生产工艺流程来看, 人们最关心的是粗锡产品中的含铅量 $A_{pb}\%$ 是否达到了工艺所规定的值, 为此常以 $A_{pb}\%$ 作为衡量产品质量的技术指标。而 $A_{pb}\%$ 的变化主要受控于 F 和 P 的变化。鉴于此, 为简化模型, 选择粗锡中的含铅量 $A_{pb}\%$ 作为过程数学模型的输出变量, 进料量 F 和入炉电功率 P 作为输入变量。

进行系统建模时, 要求输入输出数据必须是平

稳的、正态的、零均值的, 即数据的统计特性与统计时间起点无关, 且均值应为零。但在实际问题中, 由于直接得到的测量数据包含有线性 and 缓慢变化的趋势, 该序列的均值不为零, 且随时间变化, 因此必须对数据进行平稳化预处理, 去除或提取趋势项, 把量测的数据变成均值为零的平稳随机序列, 按平稳过程进行分析建模^[3]。本文对 3 个变量 $F(k)$, $P(k)$ 和 $A_{pb}(k)$ 进行了平稳化预处理。

3.2 过程模型的获取

由上述可知该过程是一个 MISO 系统, 根据 3 个主要变量, 建立真空炉出炉产品品位即粗锡含铅量 $A_{pb}\%$ 与进料量 F 及入炉电功率 P 的关系模型, 考虑到实际现场存在噪声, 在模型中加入了噪声变量 V , 并采用多变量线性过程辨识的最小二乘递推估计算法。为此假设该过程的数学模型为^[5]

$$A(q)A_{pb}(t) = \frac{B_1(q)}{G_1(q)}F(t - nk_1) + \frac{B_2(q)}{G_2(q)}P(t - nk_2) + \frac{C(q)}{D(q)}V(k) \quad (1)$$

式中

$$\begin{aligned} A(q) &= 1 + a_1q^{-1} + \dots + a_naq^{-na} \\ B_1(q) &= b_{11}q^{-1} + \dots + b_{1n_1}q^{-n_1} \\ B_2(q) &= b_{21}q^{-1} + \dots + b_{2n_2}q^{-n_2} \\ G_1(q) &= 1 + g_{11}q^{-1} + \dots + g_{1n_{g1}}q^{-n_{g1}} \\ G_2(q) &= 1 + g_{21}q^{-1} + \dots + g_{2n_{g2}}q^{-n_{g2}} \\ C(q) &= c_1q^{-1} + \dots + c_{n_c}q^{-n_c} \\ D(q) &= 1 + d_1q^{-1} + \dots + d_{n_d}q^{-n_d} \end{aligned}$$

其中: $\{a_i\}$, $\{b_{1i}\}$, $\{b_{2i}\}$, $\{g_{1i}\}$, $\{g_{2i}\}$, $\{c_i\}$, $\{d_i\}$ 为待辨识的参数序列, q^{-1} 为延迟算子。本文引用实际工业现场数据 F , P 和 $A_{pb}\%$ 作为输入输出数据序列 $\{F(k)\}$, $\{P(k)\}$ 和 $\{A_{pb}(k)\}$ 。在 Matlab 平台上进行编程和运算, 求得模型的阶次和参数, 从而建立式 (1) 所示的过程数学模型。之后, 引入另外一组 (50 组) 生产数据, 对比模型仿真输出与实际输出曲线

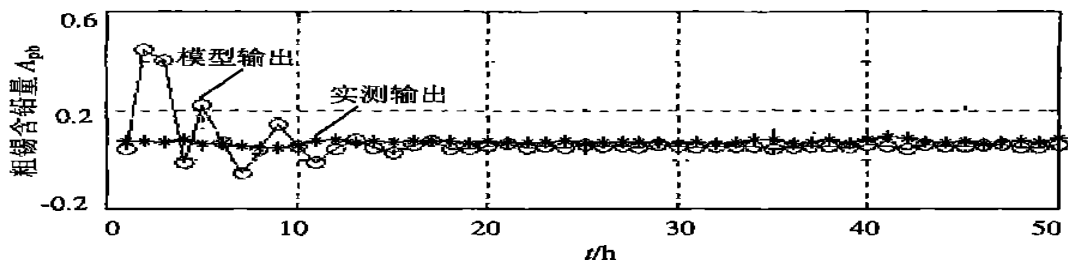


图 1 模型仿真输出与实际输出比较图

来检验模型的合理性, 具体如图 1 所示。由图 1 可见二者是比较吻合的, 说明所建立的辨识模型是合适的, 能够满足工艺要求。

4 优化控制算法

对真空脱铅炉的生产过程而言, 在保证产品品位合格的前提下, 实现入炉电功率的优化设定, 以达到低功耗、长炉寿的目的。实际生产过程中, 进料量 F 会发生波动, 为了使含铅量 $A_{pb}\%$ 稳定在工艺设定值上, 操作人员需不断地调整电功率 P 。通过现场考察及分析可知: 在进料焊锡溶液中的铅含量 A_x 、进料温度 T 一定的情况下, 当电功率 P 不变, 进料量 F 的波动将直接影响到产品的质量和产量。即增加 F , 意味着炉子的处理量提高, 但有产出物质量不合格的风险; 若 F 不变, 增加 P , 有可能保证产品质量, 但耗电多又缩短炉子的使用寿命。

为使炉子处于最佳工况, 真空炉的控制目标是在进料量发生扰动时, 通过计算机寻优运算后, 给出最佳的入炉电功率 P^* , 从而使 A_{pb} 稳定在设定值上。

为便于设计最优控制率, 需将上述辨识得到的差分方程转换为离散时间状态方程, 即将式 (1) 转化为

$$\begin{cases} X(k+1) = AX(k) + gP(k) + hF(k) \\ A_{pb}(k) = CX(k) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $A \quad R^{n \times n}, g \quad R^{n \times 1}, h \quad R^{n \times 1}, C \quad R^{1 \times n}, X(k) \quad R^{n \times 1}, P(k) \quad R^{1 \times 1}, F(k) \quad R^{1 \times 1}$ 。

考虑到生产工艺的多项要求并兼顾节能降耗, 依据在满足工艺要求的前提下尽量使入炉电功率值最低的原则, 本文选用二次型性能指标

$$J = [X(N) - X_d]^T S [X(N) - X_d] + \sum_{i=1}^{N-1} \{ [X(i) - X_d]^T Q [X(i) - X_d] + P^T(i-1) R P(i-1) \} \quad (3)$$

式中: X_d 为状态给定值; $P(i)$ 为控制量; S, Q, R 为权衡控制过程中末态偏差、状态偏差、控制能量重要性的加权矩阵。

寻找优化控制律就是确定控制量 $P(i)$ ($i = 0, 1, 2, \dots$) 使 J 达到极小。本文的优化控制算法采用给定值改变的前馈-比例最优控制律^[5], 即

$$P^*(k) = K_{FB}X(k) + K_{SP}A_{pb}(k) + K_{FF}F(k) \quad (4)$$

式中 $K_{FB} = K, K_{SP}, K_{FF}$ 的数值由递推算法求解出, 所用递推公式为

$$\begin{cases} K_{N-i} = - (G^T P_{i-1} G + R)^{-1} G^T P_{i-1} F \\ K_{FF, N-i} = - (G^T P_{i-1} G + R)^{-1} G^T (P_{i-1} H + L_{i-1}) \\ K_{SP, N-i} = - (G^T P_{i-1} G + R)^{-1} G^T (M_{i-1} - N_{i-1} G^T) \end{cases} \quad (5)$$

其中

$$\begin{cases} P_i = T_{N-i}^T P_{i-1} T_{N-i} + K_{N-i}^T R K_{N-i} + Q \\ T_{N-i} = F + G K_{N-i} \\ L_i = T_{N-i}^T (L_{i-1} + P_{i-1} (G K_{FF, N-i} + H)) \\ M_i = T_{N-i}^T (P_{i-1} G K_{SP, N-i} - M_{i-1}) + K_{N-i}^T R K_{SP, N-i} \\ N_i = T_{N-i}^T N_{i-1} + Q \\ i = 1, 2, \dots \\ \text{初始条件: } P_0 = Q + S, \quad M_0 = 0 \\ \quad \quad \quad N_0 = Q + S, \quad L_0 = 0 \end{cases}$$

由式 (4) 和 (5) 可知, 优化控制律 $P^*(k)$ 与当前状态 $X(k)$ 、扰动量 $F(k)$ 、给定值 $A_{pb}(k)$ 有关。只要其中任一项发生变化, 都可及时作出响应并给出相应的优化控制量 $P^*(k)$, 使过程控制满足生产要求。本文提出的前馈比例积分优化控制律对阶跃、脉冲型干扰具有很强的抑制能力, 并可消除稳态误差。

5 仿真结果

本文以某 10 t/d 真空炉的生产过程为对象, 工业生产过程实际记录的数据为基准进行仿真研究。由于真空炉的运行成本较高, 为了不增加生产车间成本, 同时又能尽量利用已有的生产历史数据, 该真空分厂提供了 1999 年 112 张数据记录及 2000 年 60 张数据记录。每张表单记录了各个班次每隔 1 小时的生产数据及进料量的化验结果。

经参数选取和数据预处理后, 使用本文方法, 首先利用 1999 年 80 张台帐表单数据构成的样本建立起本文所述的两输入单输出的真空炉模型, 再另取 32 张台帐表单数据完成对模型的修正。然后由所建立的对象模型设计出前馈-比例最优控制律, 按其控制律利用 Matlab 语言编写优化程序, 优化的关键在于计算 K_{FB}, K_{SP} 和 K_{FF} , 但计算这些参数时, 需先确定合适的加权矩阵 S, Q 和 R , 经过多次仿真试算, 选定合适的加权矩阵 S, Q 和 R , 再按式 (5) 计算出 K_{FB}, K_{SP} 和 K_{FF} 。

利用台帐上记录的 $A_{pb}\%$ 值, 对于不同的输入进料量 F , 运行优化控制程序即可得到相应的最优输入电功率 $P^*(k)$, 如图 2 所示。由图 2 最佳输入电功率 P^* 与原输入电功率 P 的比较可看出, 最佳输入电功率值 P^* 比原输入电功率值 P 低。

(下转第 347 页)

拟器仅采用 PID 控制时, 加载误差很大; 采用 PID 与结构不变性原理混合控制时, 舵机运动频率较低时, 加载精度很高, 但舵机运动频率较高时, 加载误差变得很大; 采用基于 CMAC 的控制器, 加载系统可在较宽的频率范围内满足对舵机系统的加载精度要求, 加载系统的动态性能得到明显改善。

6 结 语

多余力严重影响电液负载模拟器的动态加载性能, 仅采用结构不变性原理抑制多余力达不到理想效果。本文针对电液负载模拟器的特点, 将 CMAC 神经网络成功应用于电液负载模拟器的控制中, 并给出了具体的控制结构和相应算法。仿真结果表明, 该方法弥补了结构不变性原理的不足, 抑制多余力的效果明显, 极大地改善了电液负载模拟器动态加载性能, 对电液负载模拟器的设计具有很大的参考价值。

参考文献(References):

- [1] 李运华. 抑制电液力矩控制系统的多余力矩的新方法[J]. 机械工程学报, 2000, 36(3): 4-7.
(Li Yunhua. New method to restrain superfluous moment of electro-hydraulic moment control system

[J]. *Chinese J of Mechanical Engineering*, 2000, 36(3): 4-7.)

- [2] 李洪人. 液压控制系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 1981.
- [3] Albus J S. A new approach to manipulator control: The cerebellar model articulation controller (CMAC) [J]. *Trans of the ASME, J of Dynamic System Measurement and Control*, 1975, 97(3): 220-227.
- [4] Zhao Mingjie, Cheng Yiyu. Fuzzy CMAC and its application in function learning[A]. *Proc of the 3rd World Congress on Intelligent Control and Automation* [C]. Hefei, 2000. 904-907.
- [5] Kai Zhang, Feng Qian. Fuzzy CMAC and its application[A]. *Proc of the 3rd World Congress on Intelligent Control and Automation*[C]. Hefei, 2000. 944-947.
- [6] 蒋志明, 林廷圻, 黄先祥. 基于 CMAC 的带有未知负载干扰电液位置伺服系统的自学习控制[J]. 控制与决策, 2000, 15(3): 368-374.
(Jiang Zhiming, Lin Tingqi, Huang Xianxiang. The CMAC-based self-learning control for an electrohydraulic position servo system subjected to unknown disturbances[J]. *Control and Decision*, 2000, 15(3): 368-374.)

(上接第 342 页)

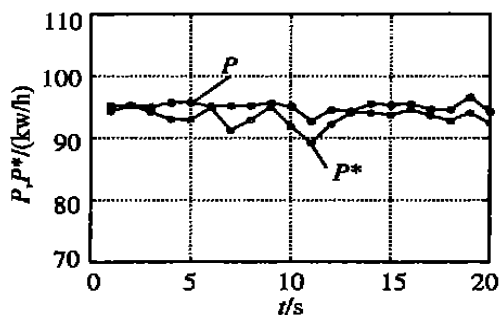


图 2 最佳电功率 P^* 与原电功率 P 的比较曲线

优化仿真结果表明, 在满足产品质量的前提下, 对不同进料量 F , 按相应的优化入炉电功率 P^* 进行生产, 可使炉子始终处于优化工况, 从而体现出优化控制的优越性和有效性。

6 结 论

本文以焊锡真空脱铅炉的优化控制问题为研究对象, 利用辨识方法建立了真空炉生产过程的数学模型, 并提出一种给定值改变的前馈-比例积分优化控制算法, 仿真结果表明了该方法的有效性。但由于

数据的来源首先不能涵盖所有情况, 且其本身具有一定的误差, 因此所建模型、提出的优化方法具有一定误差, 但它在一定范围和条件下是适用的。本文的研究工作对系统辨识和优化控制在真空炉中的实际应用具有很高的参考价值, 并能对冶金工业生产过程控制提供一个较好的示例。

参考文献(References):

- [1] 戴永年, 赵忠. 真空冶金[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000.
- [2] 冯雨辉. 内热式多级连续真空炉建模与仿真[R]. 昆明: 昆明工学院, 1994.
- [3] 黄文梅, 杨勇, 熊桂林. 系统分析与仿真——MATLAB 语言及应用[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1999. 142-166.
- [4] 徐昕, 李涛, 伯晓晨, 等. MATLAB 工具箱应用指南——控制工程篇[M]. 北京: 电子工业出版社, 2000. 78-82.
- [5] 邵惠鹤. 化工过程最优控制[M]. 北京: 化学工业出版社, 1984. 285-313.