

带钢连续热镀锌退火过程的模型化*

田玉楚

(浙江大学电机及其控制研究所·杭州, 310027)

侯春海

(华为技术有限公司·深圳, 518054)

摘要: 针对大型冷轧带钢连续热镀锌退火过程的模型化和控制难题, 本文以目前国内最先进的宝钢热镀锌生产线为对象, 建立了用于实时控制的两类新颖数学模型: 带温分布模型和带温跟踪模型, 仿真和工业运行效果良好。

关键词: 带钢; 热镀锌; 连续退火; 退火炉; 建立模型

1 引言

在大型钢铁企业冷轧带钢热处理及涂镀生产中广泛采用连续热镀锌生产技术^[1]。自1931年世界上第一条连续热镀锌退火生产线问世以来, 连续热镀锌退火工艺、设备和控制技术得到了迅速发展^[2]。在生产过程中, 带钢在连续退火炉内高速前进, 并按一定的退火曲线升温 and 冷却, 再直接入锌锅镀锌。系统建模是为了实时预测炉内的带温分布以用于控制, 而控制的主要目标是使带温满足退火曲线的要求, 但由于退火和镀锌同时进行而使控制的方法、手段、技术和性能要求等与一般的退火炉控制有所不同。进入80年代以来, 应用数学模型实现热镀锌退火炉优化控制的研究日趋活跃。迄今为止所开发的各类模型中, 有些是静态的, 有些对生产过程的描述比较粗糙, 这些均无多大的推广应用价值。而源于传热机理和严格数学推导所建立的模型对带钢沿炉长方向的横向热传导考虑不足, 又忽略了对流传热, 故适用范围有限。特别是, 已有模型大多是针对局部和个别段的, 未见有关全炉数学模型的研究报道。在我国最先进的宝钢热镀锌生产线中, 没有数学模型和计算机优化控制功能, 从而带来生产中的大量实际问题。生产过程的复杂性以及国际上对关键技术保密, 致使连续热镀锌退火过程的模型化和优化控制成为急待解决的实际工业难题。为此, 我们为宝钢热镀锌退火炉开发了混合智能控制系统^[3~5], 本文主要研究其中的全炉数学模型的导出、工程实现和参数辨识等。

2 系统分析和建模假设

宝钢的立式热镀锌退火炉由预热、还原、控冷和喷冷四段组成, 结构庞大, 展开等效长度近200m。各炉段又分为具有强耦合非线性特性的多个炉区, 炉子热惯性大, 炉内既有加热又有冷却, 传热方式差别很大、机理复杂。带钢规格、退火曲线及机组速度等经常发生变化而使工况难以稳定, 如带厚0.3~3mm不等, 机组速度0~183m/min。如此庞大复杂的

* 参加本项目部分工作的还有周玉国、谢晓清、符雪桐、杨建明、张卫平和童显威等。

本文于1994年5月18日收到, 1994年12月10日收到修改稿。

退火炉,带温和炉温检测值却极少,分别为5个和16个.简单模型难以准确描述系统特性,而复杂模型又难以满足实时性要求.为此,我们以基于传热原理和严格数学推导导出的分布参数模型为基础进行工程实现,并通过在线辨识使模型具有自学习和自适应能力.根据不同的应用目的而建立两类模型,即描述全炉带温分布模型和跟踪每一带钢小单元温度变化情况的带温跟踪模型.

根据带钢很薄、加热烧嘴或冷却气体喷嘴沿带钢两面对称分布、机组速度变化范围大、带钢物理性质以及实际运行工况等,将炉温沿炉宽方向的梯度视为零而沿带钢两面对称分布.同时,带温在炉宽方向的温度梯度也视为零,而以带厚方向上的平均带温作为带温近似值.另外,适当小空间区域内的传热特性系数(黑度系数、辐射角系数等)视为集中参数,相应的炉温和带温也视为均匀,且炉温由相应物理炉区的测量值确定.

3 分布参数模型的导出

先考虑带温分布模型.将立式退火炉按炉长方向展开,设 x 和 y 分别代表带厚和炉长方向, L 和 d 分别为等效炉长和带厚.记 $T(x,y,t)$ 和 $TZ(y,t)$ 分别为带温和炉温分布, t 为时间, C,ρ 和 K_s 分别为带钢比热、密度和导热系数, v 为机组速度.于是,由建模假设和导热定律,可得到描述全炉带温分布的二维不稳定导热方程

$$\frac{\partial T(x,y,t)}{\partial t} = \frac{1}{C\rho} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[K_s \frac{\partial T(x,y,t)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_s \frac{\partial T(x,y,t)}{\partial y} \right] \right\} - v(t) \frac{\partial T(x,y,t)}{\partial y}. \quad (1)$$

其中 $0 \leq x \leq d(y)$, $0 \leq y \leq L$, $t \geq 0$. K_s 为常数时,上式简化为

$$\frac{\partial T(x,y,t)}{\partial t} = \frac{K_s}{C\rho} \left[\frac{\partial^2 T(x,y,t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x,y,t)}{\partial y^2} \right] - v(t) \frac{\partial T(x,y,t)}{\partial y}. \quad (2)$$

为确定带钢上下表面的边界条件,考虑炉内带钢表面与退火炉之间的能量传递方式主要是辐射和对流.根据建模假设,只考虑带钢下表面的边界条件.由有关传热定律,可导出带钢下表面的热流密度 $q(y,t)$ 之关系式

$$q(y,t) = \epsilon(y)F_a\sigma[TZ^4(y,t) - T^4(0,y,t)] + h_cF_a[TZ(y,t) - T(0,y,t)], \quad (3)$$

$$\epsilon(y) = \varphi_{sw}\epsilon_s + [\epsilon_w + \epsilon_g(y)]/2. \quad (4)$$

其中 F_a :有效传热面积; σ : Stefan-Boltzmann 常数; h_c :炉气与带钢下表面的对流传热系数; ϵ_s, ϵ_g :带钢和炉气黑度系数; $\epsilon_w, \epsilon(y)$:炉墙和整个炉体对带钢下表面的总有效黑度系数; φ_{sw} 炉墙与带钢下表面的辐射角系数.

引入综合传热系数 $h(y,t)$

$$h(y,t) = \epsilon(y)\sigma[TZ^2(y,t) + T^2(0,y,t)][TZ(y,t) + T(0,y,t)] + h_c \quad (5)$$

以简化模型便于实际工程应用.故式(3)成为

$$q(y,t) = h(y,t)F_a[TZ(y,t) - T(0,y,t)], \quad (6)$$

$$\text{即} \quad \left. \frac{\partial T(x,y,t)}{\partial x} \right|_{x=0} = - \frac{h(y,t)}{K_s} [TZ(y,t) - T(0,y,t)]. \quad (7)$$

实际应用中, $h(y,t)$ 通过在线辨识确定.

为建立稳态工况下的带温跟踪模型,考虑任一跟踪单元在炉内的位置为 y_f ,记 $TS_f(x,t)$ 为跟踪单元的温度分布.稳态时可忽略带钢沿炉长方向的横向热传导,则任意

带钢小单元的移动就可视为边界场的移动. 由建模假设和导热定律, 可得到如下的一维不稳定导热方程.

$$\frac{\partial TS_f(x, t)}{\partial t} = \frac{1}{C\rho} \frac{\partial}{\partial x} \left[K_s \frac{\partial TS_f(x, t)}{\partial x} \right]. \quad (8)$$

实际计算中将 K_s 视为常数, 则上式成为

$$\frac{\partial TS_f(x, t)}{\partial t} = \frac{K_s}{C\rho} \frac{\partial^2 TS_f(x, t)}{\partial x^2}, \quad (9)$$

与式(7)类似的线性化边界条件为

$$\left. \frac{\partial TS_f(x, t)}{\partial x} \right|_{x=0} = - \frac{h(y_f, t)}{K_s} [TZ(y_f, t) - TS_f(0, t)]. \quad (10)$$

在较稳定的工况下, 带温跟踪模型和带温分布模型等价, 这时通过结构简单计算量小的带温跟踪模型便可导出全炉的带温分布规律^[5~7].

4 模型的工程实现

应用离散化技术对上述机理模型进行工程化处理以导出离散状态空间模型. 将炉内带钢划分为 $N_x \times N_y$ 个网格, 时间步长为 Δt , 分别用 i, j 和 k 简记 $i\Delta x, j\Delta y$ 和 $k\Delta t$. 适当运用前向和后向差分近似, 可将上节的带温分布模型化为

$$T(i, j, k+1) = aT(i+1, j, k) + (1-2a-2b-c)T(i, j, k) + aT(i-1, j, k) + bT(i, j+1, k) + (b+c)T(i, j-1, k), \quad (11)$$

$$a = \frac{K_s \Delta t}{C\rho \Delta x^2}, b = \frac{K_s \Delta t}{C\rho \Delta y^2}, c = v(t) \frac{\Delta t}{\Delta y}, \quad 1 \leq i \leq N_x - 1, 1 \leq j \leq N_y - 1. \quad (12)$$

按建模假设, 用 x 方向的平均带温 $\bar{T}(y, t)$ 作为带温 $TS(y, t)$ 之近似值以降低模型维数, $\bar{T}(y, t)$ 为

$$\bar{T}(j, k+1) = \frac{1}{N_x} \sum_{i=1}^{N_x} T(i, j, k+1). \quad (13)$$

将式(11)代入上式并整理, 再利用带钢上下表面的边界条件(下表面如式(7))和关系式 $TS(y, t) = \lim_{N_x \rightarrow \infty} \bar{T}(y, t)$ 得

$$TS(j, k+1) = (1-2b-c-d_{jk})TS(j, k) + (b+c)TS(j-1, k) + bTS(j+1, k) + d_{jk}TZ(j, k), \quad (14)$$

$$d_{jk} = \frac{2\Delta t}{C\rho d} h(j, k). \quad (15)$$

上两式中 $j = 1, 2, \dots, N_y - 1$. 类似地, 可导出

$$TS(0, k+1) = (1-b-d_{0k})TS(0, k) + bTS(1, k) + d_{0k}TZ(0, k), \quad (16)$$

$$TS(N_y, k+1) = (b+c)TS(N_y-1, k) + (1-b-c-d_{N_yk})TS(N_y, k) + d_{N_yk}TZ(0, k). \quad (17)$$

记

$$\begin{cases} X(k) = [TS(0, k), TS(1, k), \dots, TS(N_y, k)]^T, \\ U(k) = [TZ(0, k), TZ(1, k), \dots, TZ(N_y, k)]^T, \end{cases} \quad (18)$$

$$A(k) = [a_{pg}(k)], \quad B(k) = \text{diag}[d_{0k}, d_{1k}, \dots, d_{N_yk}]. \quad (19)$$

其中

$$a_{pp}(k) = 1 - 2b - c - d_{pk}, \quad p = 2, 3, \dots, N_y, \quad (20)$$

$$\begin{cases} a_{11}(k) = 1 - b - d_{0k}, & a_{p+1}(k) = b, \\ a_{p+1p}(k) = b + c, & p = 1, 2, \dots, N_y - 1. \end{cases} \quad (21)$$

其余的 $a_{pq}(k)$ 元素全为零。于是,可导出以带温为状态向量 X ,炉温为控制向量 U 的适宜于实时控制的离散状态空间模型。

$$X(k+1) = A(k)X(k) + B(k)U(k), \quad (22)$$

对于带温跟踪模型,其状态空间形式的导出与此相似,这里不再赘述,其最终形式为

$$TS_f(k+1) = (1 - D_{y_f})TS_f(k) + D_{y_f}TZ(y_f, k). \quad (23)$$

5 模型的参数辨识

为了满足实时性要求,这里对所导出的状态空间模型作进一步简化。实际系统设计 $\Delta t = 4s, \Delta y = 5m$ 。对某种带钢, $d = 0.001m, C = 465, \rho = 7833kg/m^3, K_s \approx 42, h(j, k)$ 在 20.77 左右,取 $v = 120m/min = 2m/s$ 时可知模型中的 b, c 和 d_{jk} 分别在 $10^{-6}, 10^0$ 和 10^{-2} 数量级。于是,将 b 近似视为零而使模型矩阵 $A(k)$ 大为简化且几乎不影响模型精度。

为了辨识模型,首先要确定辨识哪些参数。灵敏度分析表明, $h(j, k)$ 对模型的影响最为关键。故在已知带钢物性参数且这些参数波动不大时,通过辨识关键参数 $h(j, k)$ 可获得满意的模型精度^[7]。因带钢规格很多,为避开实时估计带钢物性参数的约束,实际投运的系统是对取 $b = 0$ 后 $A(k)$ 矩阵中的所有非零元素 a_{pq} 进行辨识。

其次,为了及时反映工况的变化,使模型具有自学习和自适应能力,我们采用了在线辨识的方法。不过这无疑增加了计算负担。通过多级计算机系统结构^[3~5]、模型算法和软件编程等几方面的优化设计,使模型运算时间仅约为 400ms,完全满足控制系统实时性要求。

另一个需解决的关键问题是,参数辨识需全部离散点的带温初值,但实际测量值仅 5 个。于是,首次迭代时,插值求取各测量点之间的带温初值。设 $k-1$ 时刻算得一步预测带温为 $TS_p(j, k)$, 在任意测量点 j_i 上即为 $TS_p(j_i, k), i = 1, 2, \dots, 5$ 。记 k 时刻的带温测量值为 $TS_a(j_i, k), i = 1, 2, \dots, 5$ 。则对 $\forall j: j_i \leq j \leq j_{i+1}$, 在 k 时刻计算一步预测带温 $TS_p(j, k+1)$ 所需的初始带温 $TS(j, k)$ 由下列的修正带温代替

$$TS(j, k) = \left[\frac{j_{i+1} - j}{j_{i+1} - j_i} \cdot \frac{TS_a(j_i, k)}{TS_p(j_i, k)} + \frac{j - j_i}{j_{i+1} - j_i} \cdot \frac{TS_a(j_{i+1}, k)}{TS_p(j_{i+1}, k)} \right] TS_p(j, k). \quad (24)$$

此外,作为主要操作变量和扰动因素的机组速度变化,必然引起炉况的变化。模型中仅 $c = v(k)\Delta t/\Delta y$ 与此有关。设 k 时刻速度 $v(k) \neq 0$ 时 $c(k)$ 之估计值为 $\hat{c}(k)$, 而 $k+1$ 时刻速度变化为 $v(K+1) \neq v(k)$, 则这时模型运算所用 $c(k+1)$ 值用下式的估值代替

$$\hat{c}(k+1) = \hat{c}(k)v(k+1)/v(k), \quad v(k) \neq 0. \quad (25)$$

这样,在 v 变化尚未引起炉况变化之前就可预先修正模型参数,增强了模型的预测功能。

在具体的辨识方法上,我们开发了基于知识的辨识系统^[7],实际投运的系统采用了渐消记忆的最小二乘法,均取得满意效果。

6 数值仿真与工业运行

对所开发的模型和辨识技术进行了大量仿真并投入实际工业运行。这里给出部分结果。

为了比较带温分布模型和带温跟踪模型,由稳态时某时刻的采样数据离线计算两类模型的输出曲线如图 1 所示,其中带温分布模型曲线系经过多步迭代而得的稳态输出。可见稳态时两类模型结果相近,这时可采用带温跟踪模型快速地近似计算全炉的带温分布。

其次,对机组速度变化引起模型输出带温变化的情况进行仿真得到图 2 所示结果。当机组速度加快时,加热炉段(预热、还原)和冷却炉段(控冷、喷冷)的出口带温会分别降低和升高。机组速度减慢时,情况与此相反。仿真结果与实际情况吻合。

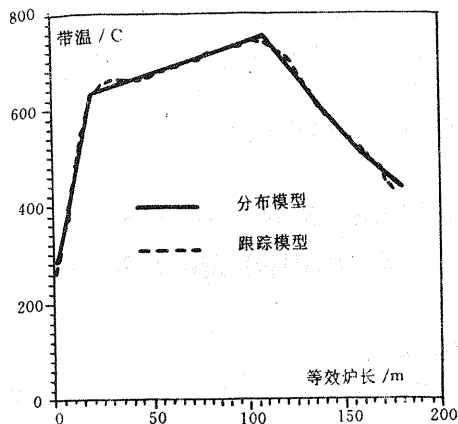


图 1 两类模型的关系

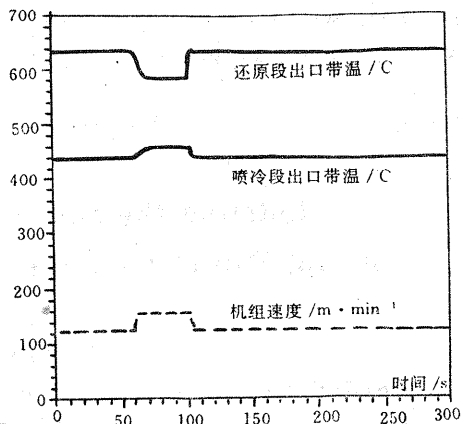


图 2 机组速度对模型输出的影响

模型投运后记录了大量的工业运行数据。根据 1994 年 1 月 21 日 09:07:35~12:00:46 约三个小时内的 180 组数据(实际的采样周期约 4s,每 15 个采样周期记录一次数据),同时作出 5 条实测带温曲线和 5 条模型输出带温曲线,如图 3 所示。可见模型精度很高,几乎难以从图上分辨模型输出和实测曲线。为给出定量结果,计算了图 3 中模型输出与实测数据之偏差的均值和均方差,五个带温(预热入口及预热、还原、控冷和喷冷各段出口)偏差之均值依次为 0.0129, -0.0933, -0.0312, 0.0234, 和 0.0541,均方差依次为

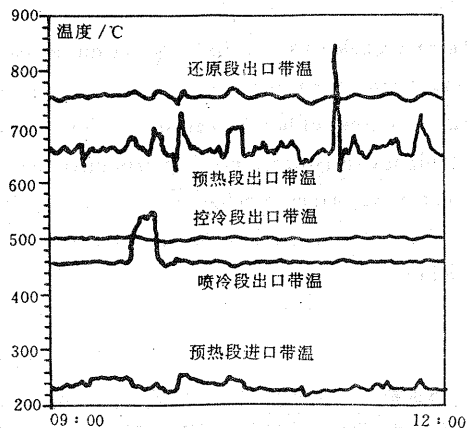


图 3 工业运行记录曲线

2.0315, 23.7085, 4.0496, 3.3201 和 8.1126。详细的分析可知,约 11:15:29 左右预热出口带温的一次大的测量误差使得该带温的模型输出值与实测值之偏差的均方差 23.7085 稍高于其它带温。故在实际运行的模型中增加了对测量数据的滤波和预处理功能。

本文将传热原理、数学推导,工程实现和系统辨识相结合,首次成功地开发了适宜于实时控制的满足精度和实时性要求的连续热镀锌退火炉的全炉数学模型,包括带温分布模型和带温跟踪模型。整个模型和混合智能控制系统自 1994 年初投入工业运行以来,运行平稳可靠,效果良好,完全达到了期望的性能要求,并已带来了明显的经济效益和社会效益。

参 考 文 献

- [1] 李九岭. 带钢连续热镀锌. 北京: 冶金工业出版社, 1981
- [2] 潘继庆. 连续热浸锌线技术的发展. 钢铁, 1990, 25(4): 70—74
- [3] 田玉楚等. 连续热镀锌退火混合控制系统的设计与实现. 基础自动化. 1994, 1(2), 8—11
- [4] 田玉楚等. 热镀锌退火炉计算机混合控制系统开发. 钢铁, 1995
- [5] 田玉楚. 信息熵在非线性动态系统中的应用(第 10, 11 章). 浙江大学博士论文, 1993, 167—194
- [6] 侯春海, 田玉楚等. 连续带钢热镀锌退火过程的数学模型开发. 1992 年中国控制与决策学术年会论文集, 哈尔滨, 1992, 340—344
- [7] 侯春海. 连续带钢热镀锌退火炉的数学模型及计算机控制. 浙江大学硕士论文, 1993

Modeling the continuous Annealing Process of Hot Dip Galvanizing for Cold Rolled Steel Strip

TIAN Yuchu

(Research Institute of Electrical Machinery and Control, Zhejiang University • Hangzhou, 310027, PRC)

HOU Chunhai

(Huawei Technology Co. Ltd • Shenzhen, 518054, PRC)

Abstract: Taking the Baosteel's hot dip galvanizing line, China's largest galvanizing line at present, as background, this paper considers the difficult problem of modeling and controlling the continuous annealing process of hot dip galvanizing for cold rolled steel strip. Two kinds of novel mathematical models suitable for real-time control, distribution model and tracking model of strip temperatures, are built. Excellent performance is achieved in numerical simulations and industrial applications.

Key words: steel strip; hot dip galvanizing; continuous annealing; annealing furnace; model building

本文作者简介

田玉楚 1962 年生. 1982 年在武汉化工学院自动化系获学士学位, 1984 年在华东工学院自动控制系统获硕士学位, 1993 年在浙江大学工业控制技术研究所获博士学位. 现在浙江大学电机系电机及其控制研究所做博士后研究. 研究方向为有关复杂系统的动力学、模型化、信息熵、智能控制与决策等方面的理论、方法、技术和应用.

侯春海 1968 年生. 1990 年在浙江大学数学系获学士学位, 1993 年在浙江大学工业控制技术研究所获硕士学位. 现为深圳华为技术有限公司工程师. 研究方向为数字用户交换机.