

# 现代控制理论工程应用的一个实例

## ——钢锭处理过程的控制

吕 勇 哉

(浙 江 大 学)

### 摘 要

本文通过对具有自由边界及可变边界的不稳定导热偏微分方程实现时域及空域同时离散化的方法,建立了一组具有约束条件的时变状态方程,从而完成了钢锭处理过程单一动态数学模型的开发。模型给出了钢锭由铸锭到初轧全过程中的热状态,即温度分布、固化进展及热焓量的动态响应。

本文同时介绍了数学模型在实现计算机模拟、计算机监督控制和状态观测器、卡尔曼滤波器等方面的应用。并由工业试验结果证明模型在线应用所带来的降低能耗、提高成材率等显著的经济效益。

文章最后还通过这一现代控制理论工业应用的实例,阐明了现代控制理论在工业控制中应用的必要性、可行性、途径和经济效益。

### 一、引 言

自六十年代初期,现代控制理论已形成为一门独立的学科,并在空间及军事工程领域中获得了成功的应用。尽管人们力图将现代控制理论应用于工业生产过程的控制,但遗憾的是二十余年来的进展并不能令人感到满意。因此,现代控制理论的工程应用仍然是控制工程师和科学家们共同关注的问题。

本文介绍作者最近在美国普度大学“应用工业控制研究所”所取得的一项研究成果,即将现代控制理论应用于钢锭处理过程的模型化和计算机控制,从而取得降低均热炉的能耗和提高钢锭成材率的显著经济效益。通过这一具体应用实例,使我们看到了现代控制理论和计算机控制对于实现以经济效益为目标的工业生产过程控制的重要意义。

钢锭处理过程通常包括从钢锭的铸锭到初轧的全部生产过程,按操作步骤大致可以分为钢锭在模内的凝固与冷却(即从铸锭到脱模);钢锭在空气中的继续凝固与冷却(即从脱模到装炉)及钢锭在均热炉中的均热与继续固化(如钢锭在装炉时仍含有液芯)等三个子过程。众所周知,操作者随时掌握钢锭在各处理阶段的热状态信息,即钢锭的固化率、温度分布及热焓量,对于实现生产过程的合理控制与科学调度,从而大幅度地降低均热炉的能耗具有决定性的意义。遗憾的是至今人们无法在实际生产过程中通

过在线测量获得上述的热状态信息,因此,借建立过程的动态数学模型及在线估计来获得钢锭热状态的信息,就成为解决上述问题的有力手段。

本文介绍作者所开发的描述钢锭在各处理阶段热状态的单一离散动态数学模型及其在实现状态估计、操作决策及计算机控制中的应用。以这一典型的实例阐述了如何将现代控制理论应用于工程实践,从而取得显著经济效益的有关问题。

## 二、过程动态数学模型的建立

在过去的若干年内,不少研究工作者从事了钢锭热状态数学描述的研究工作<sup>[11]~[14]</sup>。然而,大部分模型仅仅涉及钢锭的个别处理阶段,而且常常由于太复杂而不能方便地应用于在线控制。本节将介绍一个用于描述钢锭处理全过程的单一数学模型的开发。

在数学模型的开发过程中,假设一个长方体几何形状的实际钢锭可近似为一个圆柱体,并因为通常钢锭相当高,故可以不考虑顶、底两端的热传导,则一个三维空间的不稳定热传导的问题便简化为一维空间的相应问题,如暂不考虑圆柱体边界的传热问题,则其不稳定的热传导数学描述式可表示为

$$\frac{\partial T(r, t)}{\partial t} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T(r, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} \right), \quad (1)$$

式中  $\alpha = \frac{K}{C\rho}$  ——钢锭的热扩散系数;

$r, t$  ——分别表示沿着等效圆柱形钢锭径向的空间变量及时间变量;

$T(r, t)$  ——描述钢锭温度分布的动态响应。

为了便于计算机在线控制及现代控制理论的应用,将方程(1)通过时间及空间的同时离散化及各相应边界条件的应用和逐段线性化的方法,可转换成一系列线性离散时变状态方程,以描述钢锭内部温度分布的动态响应。

此外,借钢锭内液—固相变的热量传递的机理,建立描述液—固界面的随时间而变化的数学描述式。

综合上述的状态方程及数学描述式,最终组成了描述钢锭轧前处理过程中钢锭热状态的单一数学模型(推导方程的过程可参阅作者的专著<sup>[5]</sup>及论文<sup>[6]、[14]</sup>)。其结果可归纳如下:

### (1) 由铸锭温度到钢锭的凝固点

$$\left[ \frac{X_I(k+1)}{X_M(k+1)} \right] = A_{SP}(k) \left[ \frac{X_I(k)}{X_M(k)} \right] + B_{SP}(k) U_{SP}(k). \quad (2)$$

如锭模被分为  $M$  个单元,则方程(2)为  $(M+1) \times (M+1)$  维的时变线性状态方程。 $X_I, X_M$  分别表示钢锭及锭模的温度分布。 $U_{SP}(k)$  为环境温度。

### (2) 由凝固点至钢锭的脱模操作

$$\left[ \frac{X_I(k+1)}{X_M(k+1)} \right] = A_{IM}(k) \left[ \frac{X_I(k)}{X_M(k)} \right] + B_{IM}(k) U_{IM}(k), \quad (3)$$

$$(\Delta r)^2 = \begin{cases} \frac{2N\varepsilon\sigma\Delta r}{(2N-1)H_1\rho(k)} \sum_{k=k_j}^{k_{j-1}} (T_m^4 - T_{i+1}^4(k)) \Delta t, & j=N, \\ \frac{2j(k)K(k)}{(2j(k)-1)H_1\rho(k)} \sum_{k=k_j}^{k_{j-1}} (T_m - T_{i+1}(k)) \Delta t, & j \leq N-1, \end{cases} \quad (4)$$

式中  $U_{IM}(k)$  为环境温度。如钢锭及锭模分别分成  $N$  及  $M$  个单元，则方程 (3) 为  $(N+M) \times (N+M)$  维的时变线性状态方程。方程 (4) 描述钢锭内液-固边界随时间的移动，其边界由  $j$  单元处到  $(j-1)$  单元处所经历的时间为  $(k_{j-1} - k_j) \Delta t$ 。

### (3) 由脱模操作到装炉操作

$$X_I(k+1) = A_{IA}(k)X_I(k) + B_{IA}(k)U_{IA}(k), \quad (5)$$

$$(\Delta r)^2 = \frac{2j(k)K(k)}{(2j(k)-1)H_1\rho(k)} \sum_{k=k_j}^{k_{j-1}} (T_m - T_{i+1}(k)) \Delta t, \quad j \leq N-1. \quad (6)$$

由于脱模之后，钢锭直接暴露于空气中，因此，方程 (5) 为  $(N \times N)$  维线性时变方程。 $U_{IA}(k)$  为环境温度。

### (4) 由装炉操作到出炉操作

1) 以炉温为模型的输入参数，则

$$X_I(k+1) = A_{IP}(k)X_I(k) + B_{IP}(k)U_{IP}(k), \quad (7)$$

$$(\Delta r)^2 = \frac{2j(k)K(k)}{(2j(k)-1)H_1\rho(k)} \sum_{k=k_j}^{k_{j-1}} (T_m - T_{i+1}(k)) \Delta t. \quad (8)$$

如钢锭分成  $N$  个单元，方程则 (7) 为  $N \times N$  维线性时变状态方程， $U_{IP}(k)$  为均热炉炉温。

2) 以均热炉燃料流量为模型的输入参数，则方程 (7) 将扩展为

$$\begin{bmatrix} \frac{X_I(k+1)}{X_P(k+1)} \end{bmatrix} = A_{IPP}(k) \begin{bmatrix} \frac{X_I(k)}{X_P(k)} \end{bmatrix} + B_{IPP}(k)U_{IPP}(k). \quad (9)$$

如钢锭及炉壁分别分成  $N$  及  $P$  个单元，则方程 (9) 为  $(N+P) \times (N+P)$  维线性时变状态方程。 $X_I$ 、 $X_P$  分别描述钢锭及炉壁的温度分布， $U_{IPP}$  为燃料流量。

### (5) 由出炉操作到初轧操作

这时钢锭又重新露于大气之中，故其算式与步骤 (3) 完全相同，只是在通常的情况下，钢锭已无液芯或仅含有很小的液芯。

由上述五个操作步骤所相应的算式构成了一个系统描述钢锭热状态的单一数学模型，其相应的框图示于图 1。由图 1 可写出相应的计算机程序以实现全系统的仿真或实时控制。

该模型经美国内陆及共和两大钢铁公司的实验验证证明其精度非常之好<sup>[5,7,8]</sup>，而

且所需的计算机时间远小于国际上其它的机理模型。上述状态方程(2)、(3)、(5)、(7)、(9)中各系数矩阵中元素的计算式可参阅专著[5]。

### 三、模型的计算机在线应用

钢锭处理过程数学模型开发的目的是为了实现在生产过程的在线计算机控制与最佳生产调度,从而降低均热炉的能耗及提高其生产能力。其模型的计算机在线应用大致可分成如下几个方面:

#### (1) 以机理模型直接实现计算机的监督控制

如上所述,钢锭处理过程的机理模型可给出钢锭在传搁过程中的热状态,从而为钢锭生产过程的脱模、装炉及出炉等操作作出一系列的最佳决策,同时为实现均热炉的计算机设定值控制提供必需的信息。

关于均热炉的温度设定值,可按照由数学模型给出的钢锭在均热炉中的热状态而决定之,其具体策略及算法可参阅文献[9]。

这一模型被应用于美国内陆钢铁公司,即使在调度系统尚不完善的情况下,试验结果证明钢锭在均热炉中的停留时间缩短了三分之一,均热炉的能耗降低了约20%。同时,由于钢锭均热质量的提高,减少了钢锭表面氧化层的厚度,提高了钢锭的成材率,取得了显著的经济效益[7]。

#### (2) 钢锭温度分布的在线状态估计

除了直接应用上面所开发的机理模型实现计算机监督控制外,还可以应用简化机理模型实现在均热炉内钢锭温度分布的在线状态估计,也即状态观测器及卡尔曼滤波器。

##### 1) 机理模型的简化途径

如上所述,机理模型的维数取决于钢锭在实现空间离散化时被分割成的份数。因此,为了简化机理模型,可以减少钢锭被分割的单元数 $N$ 。在设计状态观测器及卡尔曼滤波器的过程中, $N$ 分别取为3及5。

此外,上述时变状态方程可以通过采用一点线性化及恒定的热物理常数, $K$ 、 $C$ 、 $\rho$ 简化为定常(时不变)状态方程。

这样的简化将可显著地简化实时状态估计及最优控制算式所需的计算机时间及容量。

##### 2) 降阶状态观测器的应用[10]

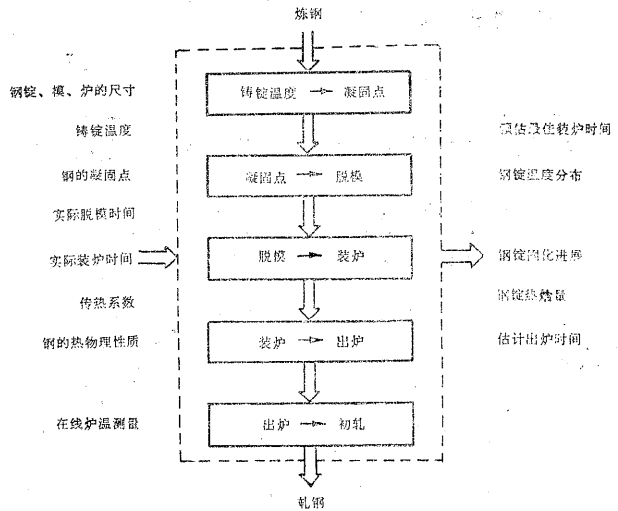


图 1 钢锭生产过程单一数学模型的结构框图

如果在简化的机理模型中, 钢锭被分成 3 份 (即  $N=3$ ), 炉壁考虑为集中参数, 则简化的机理模型可表示为下列时不变状态方程

$$\begin{aligned} X(k+1) &= AX(k) + BU(k), \\ Y(k) &= CX(k). \end{aligned} \tag{10}$$

显然, 方程 (10) 中的状态变量矢量为  $4 \times 1$  维, 它同时描述了钢锭的温度分布及炉温, 而其中仅有炉温是可测的, 即系统的输出变量。A、B 均为  $(4 \times 4)$  的常数矩阵。

计算结果证明, 矩阵

$$[C^T | A^T C^T | \dots | (A^T)^{n-1} C^T] \quad (n \text{ 为系统的维数})$$

的秩等于系统的维数, 即 4, 故该系统是完全可观的。

按照状态矢量中可测与不可测部分, 方程 (10) 可表示为分块矩阵的形式

$$\begin{bmatrix} X_1(k+1) \\ X_2(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1(k) \\ X_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} U(k), \tag{11}$$

式中  $X_1$ 、 $X_2$  分别表示不可测的钢锭温度分布及可测的炉温。则降阶状态观测器的控制算式可表示为<sup>[11]</sup>

$$\begin{aligned} \hat{X}_1(k+1) &= (A_{11} - GA_{21})\hat{X}_1(k) + GY(k+1) + (A_{12} - GA_{22})Y(k) \\ &\quad + (B_1 - GB_2)U(k), \end{aligned} \tag{12}$$

式中  $G$  为观测器的增益矩阵。

观测器与均热炉的联系如图 2 所示。图中  $Q_f(k)$ 、 $Y(k)$  分别表示输入均热炉的热量及炉温。 $T_g$  表示由计算得到的炉气温度。由此可见, 降阶观测器在获得可测的炉温、燃料流量在线信息及初始状态估值  $\hat{X}_1(0)$  (由单一数学模型给出) 的基础上, 可给出钢锭温度分布的在线估计值  $\hat{X}_1(k)$ 。

简化后的四维模型带来了严重的误差, 在燃料流量阶跃变化的作用下, 四维模型给出的温度分布动态响应如图 3 所示。但应用了降阶观测器之后, 在线估计值有效地克服了由于模型简化所带来的误差, 同时, 状态观测器还能有效地克服初始状态估值的误差。参见文献 [10]。

### 3) 卡尔曼滤波器的应用<sup>[12]</sup>

上述降阶观测器主要应用于确定性系统, 当测量值或过程本身含有严重的随机噪声的情况, 则卡尔曼滤波器用作在线状态估计是一个有力的工具。文献 [3] 介绍了卡尔曼滤波器在均热炉中的应用, 但那里钢锭表面温度作为可测的输入变量, 显然, 在实际生产过程中无法为现场工程技术人员所

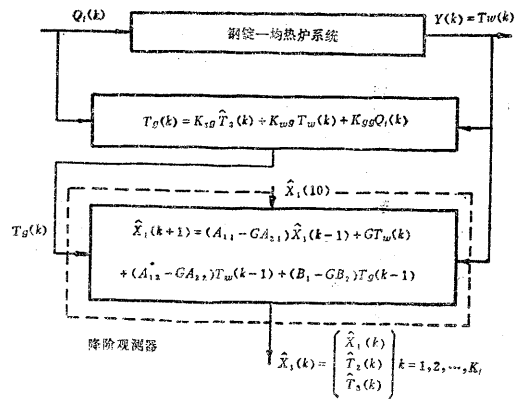


图 2 降阶观测器应用于钢锭—均热炉系统的原理图

接受。因此，本文应用作者所开发的离散数学模型，加以简化后实现以可测的燃料输入的热量及均热炉温度作为输入变量，构成卡尔曼滤波器。

钢锭—均热炉系统的随机模型可表示为

$$\begin{aligned} X(k+1) &= AX(k) + BU(k) + DW(k), \\ Y(k) &= CX(k) + V(k), \end{aligned} \tag{13}$$

式中  $W(k)$ 、 $V(k)$  分别表示过程及测量的随机噪声（零均值、高斯分布白噪声），其协方差可表示为

$$\begin{aligned} \text{cov}(W(k)W^T(j)) &= Q(k)\delta_{kj}, \\ \text{cov}(V(k)V^T(j)) &= R(k)\delta_{kj}, \\ \text{cov}(W(k)V(j)) &= 0, \end{aligned} \tag{14}$$

式中  $Q(k)$ 、 $R(k)$  分别为噪声  $W$ 、 $V$  的协方差矩阵，

$$\delta_{kj} = \begin{cases} 1, & \text{如 } k=j, \\ 0, & \text{如 } k \neq j. \end{cases} \quad \text{Kronecker delta}$$

这里钢锭被分为五个单元，炉壁考虑为集中参数，故（13）式所示的随机模型为  $6 \times 6$  维。卡尔曼滤波器的性能指标取为

$$J = E[X(k) - \hat{X}(k)]^T [X(k) - \hat{X}(k)], \quad k = 1, 2, \dots, K_f. \tag{15}$$

则最优状态估计  $\hat{X}(k)$  可由下列卡尔曼滤波算式获得

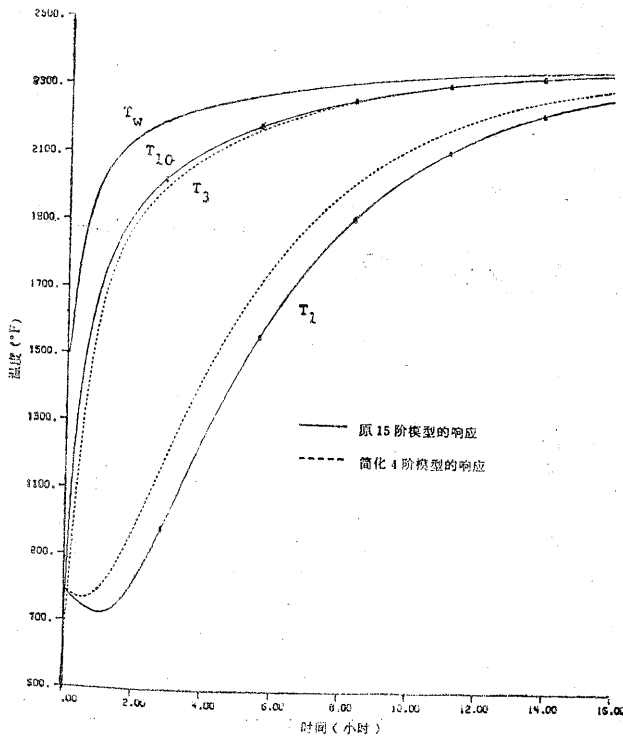


图 3 原模型与降阶模型的动态响应

$$\hat{X}(k) = \bar{X}(k) + K_c(k) (Y(k) - C\bar{X}(k)), \quad (16)$$

式中  $\bar{X}(k)$  可由下列确定性模型迭代计算求得

$$\bar{X}(k) = A\hat{X}(k-1) + BU(k-1). \quad (17)$$

卡尔曼滤波器中的增益矩阵  $K_c(k)$  可由下列递推算式解得<sup>[18]</sup>

$$\begin{aligned} K_c(k) &= M(k)C^T (CM(k)C^T + R)^{-1}, \\ P(k) &= (I - K_c(k)C)M(k), \\ M(k+1) &= AP(k)A^T + DQD^T. \end{aligned} \quad (18)$$

初始条件为

$$M(0) = E\{X(0) - \hat{X}(0)\}[X(0) - \hat{X}(0)]^T. \quad (19)$$

随机模型给出的动态响应如图 4 所示。应用卡尔曼滤波器后的响应示于文献[12]，由比较其动态响应，滤波器给出了十分良好的状态估计值。鉴于滤波器增益的收敛时间远小于状态估计的时间(如图 5 所示)，因此可应用静态滤波器增益  $K$  组成卡尔曼滤波器，其算式为

$$\hat{X}(k) = \bar{X}(k) + K_c (Y(k) - C\bar{X}(k)). \quad (20)$$

如果进一步将卡尔曼滤波器的最优状态估计结合确定性的线性最优反馈控制，便组成了随机线性最优反馈控制，其控制系统的设计可参阅文献[12]。整个钢锭处理过程的计算机控制系统示于图 6。

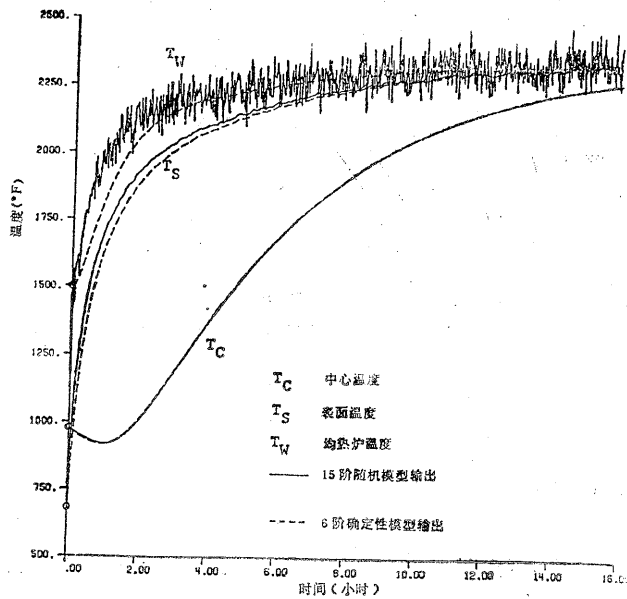


图 4. 随机模型给出的动态响应

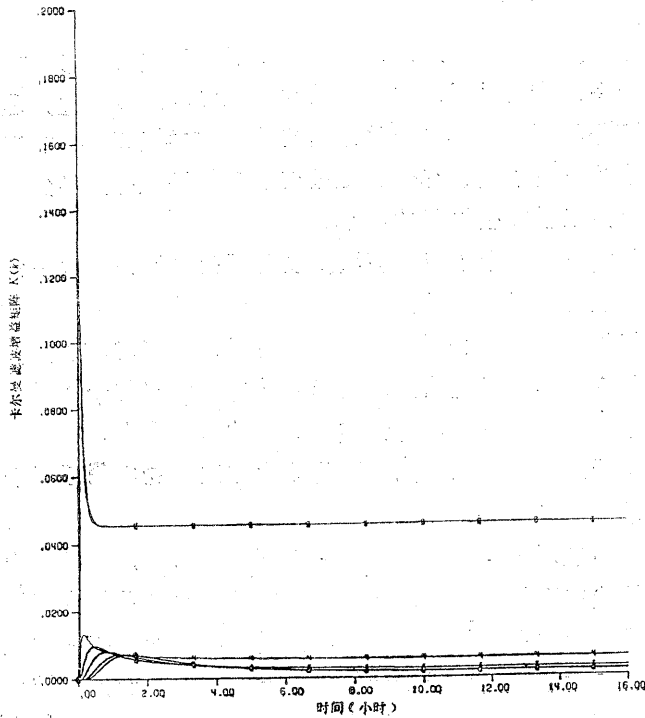


图 5 卡尔曼滤波器增益矩阵的收敛情况

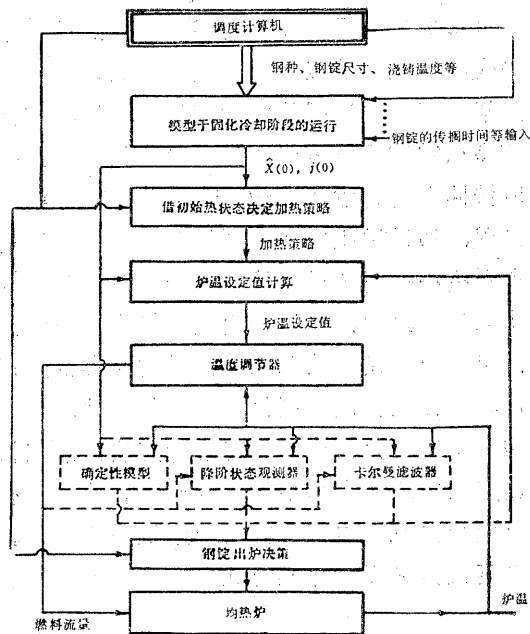


图 6 钢锭处理过程的计算机监督控制（均热炉内钢锭的热状态在线估计借助于确定性模型或降阶观测器或卡尔曼滤波器）



#### 四、结 论

本文介绍了钢锭处理过程单一数学模型的开发,也即基于描述等效圆柱形钢锭内部不稳定热传导的变系数偏微分方程,借助时间、空间的同时离散化以及成功地处理了方程的自由边界及可变边界,从而开发了描述钢锭处理过程的单一数学模型——时变状态方程及钢锭固化率的描述式。模型给出了钢锭在全部处理过程中的热状态,并经工业实验验证,模型精度良好,完全满足工业生产过程的要求。

此外,模型在线工业应用的实验,显示了应用模型实现对钢锭生产过程的计算机监督控制,获得降低均热炉能耗的显著的经济效益。

最后,应用简化模型进行了借助状态观测器和卡尔曼滤波器,实现对均热炉内钢锭热状态在线估计的计算机模拟研究,其结果说明,应用降阶状态观测器和卡尔曼滤波器可借均热炉的可测变量,即炉温及燃料流量,估计钢锭在炉内的温度分布。

通过本文所介绍的实例,对于“为何”和“如何”将现代控制理论应用于工业生产过程的控制可以得到如下的启示。

首先,由于在现代控制理论中应用了状态变量及状态空间分析方法,不仅给出了系统的输出响应,同时给出了系统状态变量的响应,例如在本文所研究的系统中即钢锭的温度分布,而通常这些状态变量是无法在实际生产过程中测得的,但是,往往这些变量的在线信息对实现提高过程的经济效益(诸如降低能耗、提高产量及改善产品质量等)具有极为重要的意义。例如,在钢锭处理过程中,只有获得钢锭热状态的在线信息,才有可能实现钢锭的液芯加热和液芯轧制,从而达到大幅度地降低均热炉能耗的经济效益。又如,在聚合反应器中,只有获得反应器转化率及难以测准的温度信息,才能最大限度地提高其转化率。因此,现代控制理论的应用决不是一种时髦的“装饰”,而是某些实际生产过程的迫切需要和获得经济效益的重要手段。尤其是对那些非局部生产过程的控制,现代控制理论的应用更有重要意义。

其次,建立与开发过程的数学模型是在过程控制中应用现代控制理论的必要基础。建立数学模型通常有系统辨识和机理模型化两大途径。尽管系统辨识的理论及方法已经发展到可以按照系统的输入—输出数据决定系统模型的结构及参数,但是对于有些复杂的工业过程,通过过程内在机理的分析建立系统的机理模型是一个十分有效的方法。其主要优点是模型描述了过程输入、输出及状态之间在机理上的联系,因此一个模型可适用于同类的生产过程,且便于模型的简化。当然,对于机理模型中那些未知的或不确定的参数,可在已定模型的基础上,借助于参数辨识的方法予以确定。钢锭处理过程模型的建立过程正说明机理模型化途径的优越性。

最后需要指出的是,在线状态估计方法,诸如状态观测器、卡尔曼滤波器等,是现代控制理论应用中的一个重要组成部分,它的应用有助于克服模型的误差,初始估值的误差以及过程与测量噪声(如应用卡尔曼滤波器)。在此基础上可进一步实现最优控制、最优调度或其它高级控制方式。

**符号说明**

- $A$  状态方程系数矩阵  
 $B$  状态方程系数矩阵  
 $C$  输出方程系数矩阵  
 $C$  钢的比热  
 $D$  过程噪声的系数矩阵  
 $G$  观测器的增益矩阵  
 $H_l$  钢的固化潜热  
 $j$  钢锭内部沿径向为液相钢的单元数  
 $K$  钢的导热系数  
 $K$  静态增益  
 $K_c$  卡尔曼滤波器的增益矩阵  
 $k$  离散化后的时间变量  
 $M$  离散化时锭模被分割成的单元数  
 $N$  离散化时钢锭被分割成的单元数  
 $P$  离散化中炉壁沿厚度方向被分割成的份数  
 $Q_f$  由燃料带入均热炉的热流量  
 $\Delta r$  离散化过程中的钢锭的空间间隔  
 $\Delta t$  离散化过程中的时间间隔  
 $T_m$  钢的凝固点  
 $T_g$  炉气温度  
 $T_w$  炉壁温度  
 $T_3$  钢锭表面单元温度 (如  $N=3$ )  
 $T_1$  钢锭中心单元温度  
 $U$  状态方程的控制矢量  
 $X$  状态矢量  
 $Y$  输出矢量  
 $\alpha$  钢锭的热扩散系数  
 $\sigma$  斯蒂芬—波兹曼常数  
 $\epsilon$  钢的黑度系数  
 $\rho$  钢的密度

**符号中下标说明**

- $I$  钢锭  
 $IA$  钢锭在空气中  
 $IM$  钢锭在模内  
 $IP$  钢锭在均热炉内  
 $IPP$  钢锭及均热炉系统

SP 钢锭温度高于其凝固点的过热态  
Sg 钢锭对炉气  
qg 燃料对炉气  
wg 炉壁对炉气

### 参 考 文 献

- [1] Kung, E. Y., Dahm, J. R. and Delancey, G. B., A Mathematical Model of Soaking Pits, ISA Trans., 6, 2 (1967), 162—168.
- [2] Soliman, J. I. and Fakhroo, E. A., Finite Element Solution of Heat Transmission in steel Ingots, Journal of Mechanical Engineering Science, 14, 1 (1972), 19—24.
- [3] Wick, H. J., On-Line Sequential Estimation of Ingot Center Temperature in a Soaking Pit, Presented at 1981 Rolling Mill Conference, AISE, Cincinnati, Ohio, May 4—6 (1981).
- [4] Jausterer, G. K., Ray, W. H. and Martens, H. R., Real Time Distributed Parameter State Estimation Applied to a two Dimension Heat Ingot, Automatica, 14 (1978), 335—344.
- [5] Lu Yongzai and Williams, T. J., Modeling, Estimation and Control of the Soaking Pit—An Example of the Development and Application of Some Modern Control Techniques to Industrial Processes, Instrument Society of America, Research Triangle Park, North Carolina (1983).
- [6] Lu Yongzai and Williams, T. J., A Discrete Dynamic Model of Steel Temperature Behavior and Soaking Pit Operation, Paper Presented at AIChE 1982 Winter National Meeting, Orlando, Florida, Feb. 28—Mar. 3 (1982).
- [7] Bilimoria, Y. E., Private Communication, Inland Steel Company, East Chicago, Indiana, Aug. 9 (1982).
- [8] Kylin, D. H., Private Communication, Republic Steel Company, Independence, Ohio, Oct. 1 (1982).
- [9] Lu Yongzai and Williams, T. J., Energy Savings and Productivity Increases with Computers—A Case Study of the Ingot Handling Process, An International Journal of Computers in Industry, North Halland 4, 1, March (1983), 1—18.
- [10] Lu Yongzai and Williams, T. J., Application of a Low order Observer to the On-Line Estimation of the Surface and Center Temperatures of Ingots in a Soaking Pit, Proceedings of

- American Control Conference. Arlington, Virginia, June 14—16, 1982, P. 936—942, and to be published at Transaction of Iron and Steel Society, U. S. A. (1983).
- [11] Luenberger, D. G., An Introduction to Observers, IEEE Trans., On Automatic Control, AC-16, 6, December (1971), 596—602.
- [12] Lu Yongzai and Williams, T. J., Strategies For Computer Control of Steel Mill Soaking Pits, Journal of Computers in Mechanical Engineering, 1, 3, January (1983), 67—75.
- [13] Hamilton, J. C., An Experimental Evaluation of Kalman Filtering, AIChE. J. 19, Sept. (1973).
- [14] 吕勇哉, 钢锭处理过程的模型化及计算机控制策略, 冶金自动化, 3—4 (1983).

# A CASE STUDY OF THE APPLICATIONS OF MODERN CONTROL THEORY TO ENGINEERING— CONTROL OF STEEL INGOT HANDLING PROCESS

Lu Yongzai

(Zhejiang University, Hangzhou)

## Abstract

This paper describes the development of a single mathematical model of the steel ingot handling process. The model, governed by a set of time-variant state space equations with constraints, is developed by carrying out the discretization in both the time and the space domains based on the partial differential equations describing unsteady state heat conduction with free and variable boundary conditions.

The resulting model gives the dynamic response of the thermal states of the ingots (namely, the temperature profile, the progress of the solidification and the total heat content in the ingot) from the teeming operation to the preliminary rolling operation.

The paper also presents the applications of the model to computer simulation, computer supervisor control and on-line state estimation by state observer and Kalman filtering respectively.

Besides, the industrial tests have shown the remarkable economical benefits of reducing the energy consumption and increasing the utilization of the steel products by the online applications of the model to the process control.

The paper finally describes the possibility, ways, necessity and economical benefits of the applications of modern control theory to industrial process control through the example of the application of modern control theory to the steel ingot handling process.