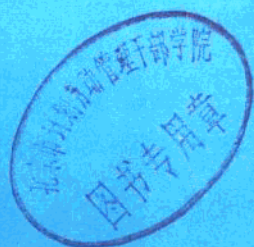


# 全国工业炉窑 自动控制学术会议 论文集

(下 册)



中国冶金自动化学会

中国应用专业委员会  
自动化学会

一九八七年七月

# 目 录

## 下 册

36. 加热炉的启发式优化策略及其计算机控制..... 杨永耀 吕勇哉( 1 )
37. 用卡尔曼滤波的加热炉氧量燃烧控制..... 李正庠( 12 )
38. 烧燃控制系统方案的设计分析及应用..... 李广进( 18 )
39. 安钢二轧厂加热炉的燃烧控制..... 魏峰鹰( 23 )
40. 自适应调节器及其在生产过程控制中的应用..... 刘 宏( 26 )
41. 天津一轧厂加热炉 PCS-8000 计算机控制系统  
..... 沈曾平 纪雪英 付 冰( 31 )
42. 微型机仪表控制系统在本钢加热炉上的应用..... 马志强 沈达敏( 41 )
43. 钢铁企业加热炉生产过程控制..... 陈南岳 范章珠( 46 )
44. 可锻铸铁退火炉的模糊和自寻优控制..... 安建民( 57 )
45. 包钢初轧厂7\*均热炉微机控制烧钢系统..... 李喜珍( 62 )
46. YEW PACK MARK II 在包钢无缝厂1\*环形炉的应用..... 郭 哲( 68 )
47. 唐钢二轧厂连续式加热炉微机控制系统..... 李功荣 赵东升( 78 )
48. SYSTEM 15 控制软件包的开发..... 张新江( 86 )
49. 连续加热炉数学模型的建立与计算机仿真..... 徐用懋 谢 洪( 96 )
50. 马钢初轧厂均热炉微机控制系统  
..... 苗锡昌 张家义 李家曙 曹正路(104)
51. 马钢车轮轮箍厂4\*环形加热炉微机控制系统  
..... 雷维全 李家曙 苗锡昌 杨 海 夏 颖(110)
52. 集散型微机控制系统在环形加热炉上的应用..... 郑自德 何 艾(117)
53. 工业炉废气残氧闭环控制系统实施方法探讨..... 何 艾(121)
54. 敞焰少氧化连续加热炉研究  
..... 陈世海 张洪芝 郭玉刚 张济廷 陈明光(126)
55. 三段式加热炉的自动燃烧控制系统..... 罗兴权(131)
56. 一种适用于炉窑控制的“小集散”系统..... 夏德海(137)
57. 一种快速钢锭加热模型..... 蔡大雄 刘文江 戴 莹(144)
58. 罩式退火炉微机自适应群控系统

- ..... 舒迪前 刘宏才 吴保亮 王 京 郑福建 黄程阳(151)
59. YEW PACK MARK I 集散型系统在环形加热炉上的应用  
..... 冯 强 李小明(165)
60. 均热炉的燃烧控制系统..... 秦大海(174)
61. 鼓风式铅锌冶炼炉渣含锌量的自校正多步预报控制  
..... 马润津 李守祥 王 霏 潘家净 黎 实(180)
62. 微机热处理程序控制系统的分析与设计..... 薛荆岩 钱景文(185)
63. 沸腾焙烧炉计算机建模..... 阳锡钢 吴礼民(189)
64. 环路法综合快速准确跟踪及强抗扰动的控制系统  
..... 李镇信 李自如 崔士义(203)
65. 华北铝加工厂箱式退火炉微机控制..... 潘家净 李守祥(215)
66. 单片机在工业电阻炉控温系统中的应用..... 阮关庭(220)
67. 电加热炉的前馈解耦零极点配置自校正温控控制  
..... 陈源阳 郎世俊(225)
68. 磨极值自适应控制..... 于长官 丁 宏(231)
69. 井式热处理渗碳炉群控系统..... 黄森林(235)
70. YEW PACK MARK I 在焦炉过程控制中的应用... 初福江 张文飞(238)
71. 大型铜镍矿热电炉采用电液伺服伐进行电极功率自动调节  
..... 严汉彦(246)
72. 8749 单片计算机装置控制矿热炉负荷  
..... 冯异才 严功毅 封信彬 罗文勋 黄塞阳(252)
73. 单板机在烧结点火自控中的应用..... 任瑞刚(259)
74. 黄磷炉三相电极电流微机自控系统  
..... 任朝锋 王守本 刘子震 张全我(261)
75. 直接数学群控系统在电加热炉上的应用..... 况立志(270)
76. 钢铁企业高炉、焦炉煤气供需平衡分散型计算机控制系统工程探索  
..... 项家丛(273)
77. 电加热炉的微机模糊控温系统..... 王汝荣(281)
78. 现代铁合金厂的自动化及分布式系统的应用..... 王玉华(289)
79. 集散系统在焦炉加热控制上的应用..... 郭 健 高宪平 孙 华(300)

# 加热炉的启发式优化策略 及其计算机控制

杨永耀 吕勇哉

(浙 江 大 学)

本文提出了一种基于动态数学模型的启发式优化策略,以求取加热炉的最佳炉温设定值。该优化算法以启发式规则制导,采用路径试探法求解,具取搜索效率高,收敛速度快等优点。以上述优化策略为基础,作者提出了一个递阶计算机控制结构,以实现加热炉的启发式优化控制。该系统的工程实施表明其性能可靠,控制准确,并取得了降低能耗9%,提高钢坯加热质量的显著效果,直接经济效益达100万元/年以上。

## 一、引 言

70年代以来,由于现代化大型高速轧机的发展以及自然能源紧缺的影响,对轧钢加热炉的操作及钢坯的加热质量提出了新的要求,使得传统的控制方式逐渐不能适应新的形势。因而,加热炉的模型化与计算机控制的研究开始受到人们普遍的重视。与此同时,电子计算机硬、软件技术的迅速发展也为人们研究加热炉的数学模型和高级控制策略提供了有力的工具。近年来,国际上在加热炉的模型化及计算机控制的研究方面都取得了一定的进展,并研究成功了一些具有实用价值的计算机控制系统<sup>[1,2]</sup>。但是,该领域的研究还很不深入,多数学者的研究工作停留在理论和仿真阶段,研究成果在工程上获得成功应用的实例不多。总之,要实现对加热炉的高级计算机控制,还存在许多问题有待解决,诸如开发具有工程应用精度和一定实时性能的数学模型,研究适应性强的加热炉计算机控制策略等。

由于加热炉生产过程的典型分布参数特性以及复杂的边界条件,致使许多经典的最优控制算法(诸如极大值原理、变分方法、动态规划等)变得十分复杂(有些甚至无法求解),结果使得相应的工程实施难以进行。本文提出了基于动态数学模型的加热炉启发式优化控制策略,以避开上述最优控制中易于出现的“组合爆炸”问题,从而为采用微型计算机实现加热炉的实时计算机优化控制奠定了基础。启发式搜索技术最早是在运筹学问题中提出的,后来逐渐成为人工智能中应用得最为广泛的搜索技术,它在定理证

明、问题求解、博弈对策等方面均显示出其优越性<sup>[3]</sup>，然而在过程控制领域中的应用还不多见。随着人工智能及智能控制研究的不断深入，启发式的思想已开始受到过程控制界人士的重视。

## 二、加热炉动态数学模型

加热炉是钢材热轧生产线上的重要设备之一，它的控制好坏将直接影响加热炉的产量、能耗以及钢材最终产品的质量。通常在钢材热轧车间，钢坯原料由推钢机源源不断地送入加热炉，并先后经过预热、加热、均热等炉段的加热后送给轧钢机，钢坯在炉内的移动速度及炉内加热时间是由后续轧机的生产节奏所决定的，图1是一个三段式连续加热炉的示意图。

加热炉控制的主要目标是使钢坯经炉内加热后其温度分布满足轧钢所规定的工艺指标，并力求整个加热过程中加热炉的能耗最小。显然，钢坯加热过程中其温度分布对实现加热炉的最佳控制具有决定性的意义，遗憾的是迄今为止在实际生产过程中人们还无法直接测量炉内加热钢坯的温度分布。

加热炉模型化的目的之一就是要克服炉内钢坯温度分布不能直接检测的困难，通过加热过程的机理分析并采用适当的建模方法，得出描述钢坯温度分布规律的数学关系式，然后根据加热炉生产过程的可测变量（诸如加热炉各段炉温，钢坯的规格，炉内经历的加热时间等）计算出钢坯在炉内加热过程中的温度分布，从而为加热炉的控制提供必要的信息。

本文作者以实时控制应用为目的并根据加热炉优化控制的要求，采用图2所示的移动坐标系研究开发了钢坯跟踪加热数学模型<sup>[4]</sup>。在该移动坐标系下，炉内任一钢坯（跟踪钢坯）的移动加热问题就转化为静止钢坯在时变温度场中的加热问题。设钢坯温度为沿厚度方向作一维分布，则由富里埃导热定律可得下述一维不稳定导热方程：

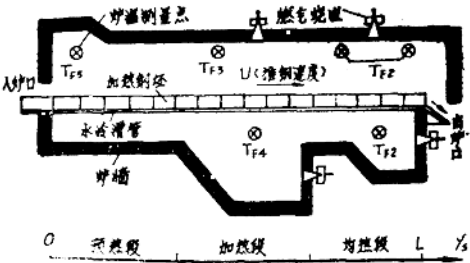


图1. 三段式连续加热炉示意图

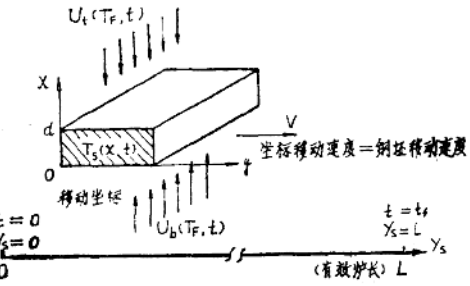


图2. 移动坐标系示意图

$$\frac{\partial T_s(x, t)}{\partial t} = \frac{1}{C(T_s)\rho(T_s)} \frac{\partial}{\partial x} \left( K(T_s) \frac{\partial T_s(x, t)}{\partial x} \right) \quad (1)$$

$$0 \geq t \geq t_1, 0 \leq x \leq d$$

式中:  $T_s(x, t)$ ——跟踪钢坯的温度分布;  $C$ 、 $\rho$ 、 $K$ ——分别为钢坯的比热、密度和

导热系数, 均为钢坯平均温度的函数;  $\bar{T}_s = \frac{1}{d} \int_0^d T_s(x, t) dx$  (2)

钢坯加热的边界条件可由有关辐射、对流、传热定律及钢坯边界面上的能量平衡关系导出:

$$\left. \frac{\partial T_s(x, t)}{\partial x} \right|_{x=0} = - \frac{h_b(y_s, T_{sb}, u_b, t)}{\alpha(T_s)} [u_b(T_r, t) - T_s(0, t)] \quad (3)$$

$$\left. \frac{\partial T_s(x, t)}{\partial x} \right|_{x=d} = - \frac{h_t(y_s, T_{st}, u_t, t)}{K(\bar{T}_s)} [u_t(T_r, t) - T_s(d, t)] \quad (4)$$

式中:  $u_t$ 、 $u_b$ ——分别为上、下部炉温分布;

$$T_r = [T_{r1}, T_{r2}, T_{r3}, T_{r4}, T_{r5}, T_{r6}]^T; T_{st} = T_s(d, t); T_{sb} = T_s(0, t);$$

$h_t$ 、 $h_b$ ——分别为上、下炉区等效综合传热系数;

$$y_s = \int_0^t U(\tau) d\tau \text{——跟踪钢坯炉内位置。} \quad (5)$$

式(1~5)为描述跟踪钢坯加热过程温度分布的基本数学关系式。显然, 由于复杂的边界条件, 要严格地求解上述偏微分方程是十分困难的。为了充分地发挥计算机的数值计算能力, 对上述连续的偏微分方程及相应的边界条件作时间和空间的离散化处理, 并应用有限差分来近似对应的偏微分项, 然后通过适当地选择状态向量与控制向量, 便可得到钢坯跟踪加热的离散状态空间模型<sup>[4]</sup>:

$$X_s(k+1) = A(X_s(k), U(k), k)X(k) + E(X_s(k), U(k), k)U(k) \quad (6)$$

式中

$$X_s(k) = \begin{pmatrix} T_s(1\Delta x, k\Delta t) \\ T_s(2\Delta x, k\Delta t) \\ \vdots \\ T_s(N\Delta x, k\Delta t) \end{pmatrix} \quad U(k) = \begin{pmatrix} u_b(T_r, k) \\ u_t(T_r, k) \end{pmatrix} \quad (7)$$

$A(X(k), U(k), k) \in R^{N \times N}$ ——时变系统矩阵;

$B(X(k), U(k), k) \in R^{N \times 2}$ ——时变控制矩阵;

$\Delta t$ 、 $\Delta x$ ——分别为时间、空间离散步长。

这样, 对于钢坯在炉内的加热过程, 只要知道钢坯开始加热时的温度分布  $X_s(0)$  以及炉温分布  $\{u(k), k \in (0, \infty)\}$ , 就可以由 (6) 式递推计算出炉内钢坯加热过程中的温度分布  $\{X_s(k), k \in [0, k_f]\}$ , 也即钢坯在任意时刻的温度分布可由下述映射确定:

$$\{X_s(0), U(k), k=0, 1, \dots, k_m\} \xrightarrow{\Sigma(A, B)} X_s(k_m+1) \quad (8)$$

可见, 该模型起了软件检测及预报的双重作用, 从而为实现直接对钢坯温度分布的控制奠定了基础。

### 三、启发式优化控制策略

加热炉优化控制的任務, 是根据轧钢生产工况及炉内加热钢坯原料情况, 决定加热炉的最佳炉温设定值, 从而使得在满足钢坯出炉温度分布条件及过程工艺约束的前提下, 使加热过程的能耗达到极小, 该问题可描述为如下的数学命题:

$$\min_{T_F \in \Omega(T_F)} J = \sum_{k=0}^k \|T_F(k)\|_{R_F(k)} \quad (9)$$

约束条件:

$$X_e^* - \delta \leq Y(k_f) \leq X^* + \delta \quad (10)$$

动态方程 (6)

初始状态  $X_s(0) = X_{s0}$

式中:  $\Omega(T_F) = [T_{F=1}, T_{F=N}]$  为允许炉温集合;

$X_e^* = [X_e^*(1) X_e^*(2) \dots X_e^*(N)]^T$  为钢坯出炉温度分布期望值;

$R_F$ ——性能指标加权矩阵;

$\delta$ ——钢坯出炉温度允许误差向量。

由于加热炉典型的分布参数特性及复杂的边界条件, 采用经典控制理论来求解上述最优问题极为复杂。这里, 作者把加热炉的控制策略分解为准稳态最优化及设定值动态补偿两部分, 并提出一种启发式算法来求解其准稳态优化问题。显然, 对应于准稳态工况, (9) 式可以简化成:

$$\min_{T_F \in \Omega(T_F)} \|T_F\|_{R_{F0}} \quad (9')$$

下面介绍启发式优化算法的有关内容。

轧钢加热炉（尤其是用于中厚板生产的加热炉）生产过程中，工况变化较为频繁，为了避免由于工况的微小扰动而触发优化计算，提出了准稳态工况概念。即事先根据加热炉生产过程中可能出现的不同工况构造一个准稳态工况分类表，对于连续变化的工况选用典型的离散值近似，并把准稳态工况表作为背景知识存贮在计算机中。准稳态工况表采用树形结构表示（如图3），根节点为钢坯原料集，此后按钢种、规格、轧钢速度、初始炉温设定等逐渐分枝，向纵深发展。加热炉准稳态工况最优化控制的求取分二阶段进行，第一阶段是根据加热炉的当前的实际生产工况与准稳态工况表匹配以求得对应的准稳态工况。由于设计过程中已考虑到稳态工况表不致过分庞复，因而匹配过程可采用穷举法。本文采用宽度优先法进行，即先对钢种进行匹配，然后依次为规格、轧钢速率，以得到对应的准稳态工况及初始炉温设定值  $T_F^{(0)}$ 。当实际的轧钢速率  $V$  处在两个相邻的准稳态速率  $V_i$  与  $V_{i+1}$  之间时，其对应的准稳态速率  $V_0$  由下式确定：

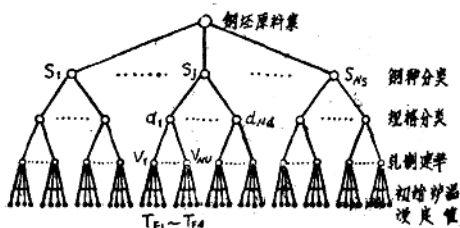


图3 准稳态工况表的结构

$$V_0 = \begin{cases} V_i & V - V_i \leq \frac{1}{2} dV_i \\ V_{i+1} & V - V_i > \frac{1}{2} dV_i \end{cases} \quad (11)$$

式中：  $dV_i = V_{i+1} - V_i$  (12)

第二阶段为对应准稳态工况下的寻优过程，即以第一阶段结束时得到的准稳态工况和相应的初始炉温设定值为起点求取加热炉各段炉温的最佳设定值  $T_F^*$ 。下面先定义终点目标误差向量：

$$P[X_s(k_i)] = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f[x_N(k_i) - x_s^*(N)] \\ f[\Delta X_s(k_i) - \Delta X_s^* - \delta] \\ f[x_1(k_i) - x_s^*(1)] \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中,

$$f(x) = \begin{cases} 0 & \text{当 } x \leq \delta \text{ 时} \\ x & \text{当 } x > \delta \text{ 时} \end{cases} \quad (14)$$

$$\Delta X_e^* = M_{ax} \{ X_e^*(1) \times e(z) \cdots X_e^*(N) \} - \text{Min} \{ X_e^*(1) X_e^*(2) \cdots X_e^*(N) \},$$

$$\Delta X_s(k_t) = M_{ax} \{ X_1(k_t) X_2(k_t) \cdots X_N(k_t) \} - \text{Min} \{ X_1(k_t) X_2(k_t) \cdots X_N(k_t) \}.$$

则炉温设定值的启发式寻优算法可表示为下述递归过程:

(1) 设置寻优开始标记  $i \leftarrow 0$ , 并以第一阶段的匹配结果作为搜索起点;

(2) 根据  $T_{F_0}^{(i)}$  及准稳态工况决定  $U^{(i)}(k)$ , 并调用动态数学模型计算给定控制作用

$U^{(i)}(k)$  下的钢坯出炉温度分布  $X_s^{(i)}(k)$  即:

$$\{ X_s(0), U_{(k)}^{(i)}, k = 0, 1, \dots, k_t - 1 \} \xrightarrow{\Sigma(A, B)} X_s^{(i)}(k_t);$$

(3) 由 (9) 及 (13~14) 式分别计算  $J^{(i)}$  和  $P^{(i)}[X_s^{(i)}(k_t)]$ ;

(4) 如果  $P^{(i)}[X_s^{(i)}(k_t)] = 0$  且  $J^{(i)} = J_{\min}$ , 则最佳设定值求得, 转入 (7);

(5) 根据  $P^{(i)}$  在启发式规则集中选出合适规则, 以决定新的试探炉温设定

值  $T_{F_0}^{(i+1)}$ ;

(6) 置  $i \leftarrow i + 1$ , 返回 (2) 重复上述过程;

(7) 令  $T_{F_0}^* = T_{F_0}^{(i)}$ ,  $X_s^*(k) = X_s^{(i)}(k)$ ,  $k = 1, 2, \dots, k_t$

(8) 过程结束

图 4 是炉温设定值启发式优化过程的原理示意图, 显然, 上述优化过程的关键是启发式规则集的构造, 启发式规则集的启发能力及可靠性从某种程度上决定了整个优化过程的效率。本文中启发式规则集是由一系列产生式规则所构成, 它们主要来源于两个方

面；人工专家的操作经验以及动态模型所综合出的规则。

由加热炉生产过程中人工专家的经验，可归纳出如下启发式规则：

- 炉内加热钢坯厚度增大时，加热炉各段炉温设定值应相应提高；
- 轧钢速率加快时，加热炉各段炉温要相应提高；
- 加热特殊合金钢时，要比加热普碳钢困难，等等。

可以看出这类规则较为粗糙，因而其启发能力较小。本文中这类规则主要用于决定第一阶段中的初始炉温设定值的选取，以给出较为合理的搜索起点，加速启发式寻优过程的收敛速度。

基于动态数学模型的计算机仿真，是本文中的启发式规则的主要源泉。通过计算机仿真来模拟各种不同工况下的钢坯加热过程，总结炉温设定值对钢坯温度分布的影响规律，并根据炉温设定值与性能指标之间的关系，便可综合得到有关的启发式规则。每一条启发式规则由二大部分组成：条件（或前提）部分与动作（或结论）部分。因为本文中优化是在准稳态工况下进行的，亦即在一组优化过程中炉内钢坯原料属性和轧钢生产节奏被认为是 不变的，因而条件部分主要表示终点目标误差向量，而动作部分则表示相应的炉温设定值修正方向。这样，由动态数学模型仿真而导出的启发式规则如表 1 所示。

上述启发式规则也可以用矩阵对来表示。定义矩阵对：

$\phi_{\text{CON}} \in m \times l_1$  —— 条件矩阵

(15)

$\phi_{\text{A.CT}} \in m \times l_2$  —— 动作矩阵

式中：m —— 要表示的规则条数；

$l_1$  —— 一条规则的条件数；

$l_2$  —— 一条规则的动作序列数。

则表 1 所示的规则就可以方便地用  $\phi_{\text{CON}}$  与  $\phi_{\text{A.CT}}$  来表示。用矩阵对来表示规则后，就可以定义规则的运算以及规则的定量化研究等，从而显示出更大的灵活性，此外，矩阵表示的规则集很容易在计算机上实现。

表 2 给出了某一规格的钢坯在几种典型的轧钢节奏下由启发式优化算法得出的炉温设定值与常规热工制度所规定的炉温设定值比较。钢坯出炉要求为平均温度  $1200^\circ\text{C}$ ，

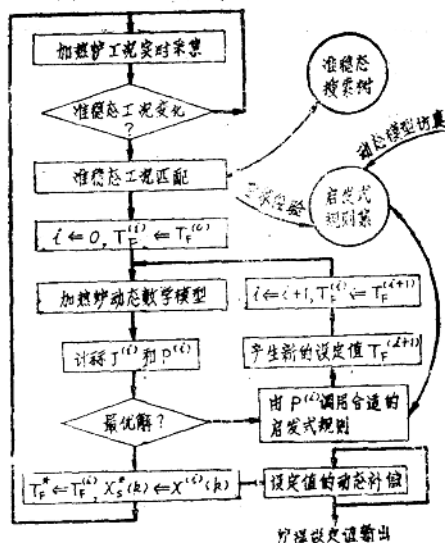


图 4. 炉温设定值启发式优化过程示意图

表1. 由动态模型导出的部分启发式规划

| 规 则<br>序 号 | 条件 (前提) 部分 |       |       | 动 作 (结 论) 部 分   |                 |                 |                 |
|------------|------------|-------|-------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|            | $P_1$      | $P_2$ | $P_3$ | $\Delta T_{F1}$ | $\Delta T_{F2}$ | $\Delta T_{F3}$ | $\Delta T_{F4}$ |
| 1          | > 0        | > 0   | > 0   | < 0             | < 0             | = 0             | = 0             |
| 2          | = 0        | > 0   | > 0   | = 0             | < 0             | = 0             | = 0             |
| 3          | < 0        | > 0   | > 0   | = 0             | < 0             | > 0             | = 0             |
| 4          | > 0        | > 0   | = 0   | < 0             | = 0             | = 0             | = 0             |
| 5          | = 0        | > 0   | = 0   | < 0             | < 0             | > 0             | > 0             |
| 6          | < 0        | > 0   | = 0   | = 0             | = 0             | > 0             | = 0             |
| 7          | > 0        | > 0   | < 0   | < 0             | = 0             | = 0             | > 0             |
| 8          | = 0        | > 0   | < 0   | = 0             | = 0             | = 0             | > 0             |
| 9          | < 0        | > 0   | < 0   | = 0             | = 0             | > 0             | > 0             |
| 10         | > 0        | = 0   | > 0   | = 0             | = 0             | < 0             | < 0             |
| 11         | = 0        | = 0   | > 0   | = 0             | = 0             | = 0             | < 0             |
| 12         | < 0        | = 0   | > 0   | > 0             | = 0             | = 0             | < 0             |
| 13         | > 0        | = 0   | = 0   | = 0             | = 0             | < 0             | = 0             |
| 14         | = 0        | = 0   | = 0   | > 0             | = 0             | = 0             | = 0             |
| 15         | > 0        | = 0   | < 0   | = 0             | > 0             | < 0             | = 0             |
| ...        | ...        | ...   | ...   | ...             | ...             | ...             | ...             |

注:  $\Delta T_{Fi} = T_{Fi}^{(i+1)} - T_{Fi}^{(i)}$  为搜索炉温设定值增量

钢坯温差小于 $20^{\circ}\text{C}$ 。从上表的结果可以看出,采用启发式优化算法对加热炉进行炉温设定值控制将获得显著的节能效果。

表2. 优化算法与常规制度的炉温设定值对比

| 钢坯厚度<br>mm | 推钢速率<br>m/s | 启发式优化的炉温设定 |          |          |          |
|------------|-------------|------------|----------|----------|----------|
|            |             | $T_{F1}$   | $T_{F2}$ | $T_{F3}$ | $T_{F4}$ |
| 220        | 0.0010      | 1210       | 1230     | 1020     | 1020     |
|            | 0.0015      | 1230       | 1250     | 1080     | 1080     |
|            | 0.0020      | 1230       | 1250     | 1180     | 1200     |
| 常规制度炉温设定   |             | 1280       | 1300     | 1220     | 1250     |

在上述炉温设定值启发式优化过程中,加热炉的动态数学模型起着重要的作用。动态数学模型是启发式规则形成的基础之一,它隐含地决定了规则集中大多数生成式规则,这些规则确定了优化过程中的搜索方向。此外,当一组新的试探炉温选定以后,又要根据动态数学模型、初始条件计算钢坯温度分布的响应,即:  $\{X_s(0), U^{(i)}(k), k=0, \dots, k_i-1\} \xrightarrow{\Sigma(A, R)} X_s(K_i)$  为后续性能指标、终点目标误差向量的计算及结束条件的判别提供必要的信息。为区别于一般的启发式过程,我们称本文所提出的算法为基于动态模型的启发式优化算法,这种算法具有下列优点:

(1) 对于一些复杂的生产过程及新建的装置,人们往往难以凭借经验来提取其启发式规则,而基于动态模型来综合规则不受上述限制。

(2) 由经验提取的规则往往启发能力较弱,容易导致误搜索。而基于动态模型的启发式规则在提供定性描述的同时还能给出一些定量的关系,从而得到高效率的搜索过程。

(3) 基于动态模型的启发式规则,可以按照过程状态和环境特性的变化自动地对相应的规则予以修改,因而适应能力较强。而专家经验形成的规则较难做到这一点。

本文提出的启发式优化算法中的搜索过程与人工智能中常用的启发式搜索过程(如  $A^*$ 、Backtrach等<sup>[6]</sup>)其原理是不同的。如  $A^*$  等中,多采用节点扩展技术,并采用启发式函数来决定节点扩展次序,直至求得问题的解。而在本文中的启发式搜索过程中,采用的是路径探索法,并采用启发生成规则来决定路径探索的方向,直至求得问题的解。对于一个  $M$  级决策问题,设在每一级决策过程中可供选择的决策变量数为  $b$ ,则该决策问题可用一个深度为  $M$ 、分枝系数为  $b$  的一个均匀树来表示。图5是上述两种搜索过程的示意图,处于  $i$  级中的节点代表第  $i$  级的决策变量,从初始节点到叶节点的任一条路径表示一个完整的决策过程,这里我们称之为一个策略。显然,这两种搜索过程的本质差

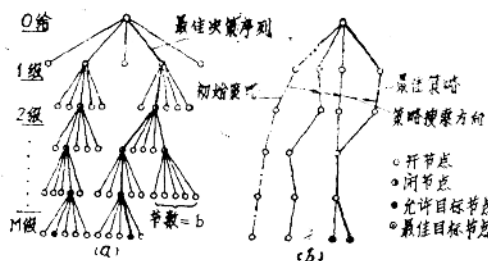


图5. 两类搜索过程的示意图

(a) \* 搜索: 节点扩展的部分树;

(b) 路径试探搜索

别在于前者以单个决策变量进行搜索, 而后者则着眼于策略搜索。

在复杂的决策过程中, A\*等算法所遇到的困难是很难获得具有相容性及一致性的启发式函数, 对于过程控制中的决策问题, 要从决策的中间过程来估计对应的启发式函数更是不容易。一般来说, 启发式函数的误差与节点和目标节点之间的距离成一定的比例关系, 即节点离目标节点越远, 该节点的启发式函数的误差也越大。在这种性质的启发式

函数的制导下, A\*等算法的复杂性与 $M$ 成指数关系增长<sup>[5]</sup>, 即随着决策级 $M$ 的增长, 算法将遇到“维数灾”问题。本文提出的路径试探法, 由于其终点目标误差能准确地求得, 且基于动态模型的启发式规则的构造也较为方便, 能有效地选择新的试探路径, 从而使得路径逐渐向最佳策略逼近。作者认为, 对于一般的过程控制中的优化决策问题, 这种方法有其独特的优点。计算机仿真的结果表明, 只要启发式规则选择得当, 这种算法的复杂性与 $M$ 成线性关系。

#### 四、控制系统的工程实施

以本文提出的启发式优化算法为基础, 作者提出了一个加热炉递阶计算机控制方案, 并在重庆钢铁公司第五钢铁厂的三座推钢式加热炉上完成了工程实施, 图6是该系统的原理示意图。监督控制级主要完成炉内加热钢坯温度分布实时估计、稳态优化炉温设定值(由启发式优化算法提供)的综合及设定值的动态补偿<sup>[7]</sup>, 此外还完成生产计划管理及现场数据采集等功能。 $M$ 级则根据监督控制级的炉温设定值实现最佳燃烧控制。整个系统的硬件配置请参见参考文献<sup>[8]</sup>。

该系统1986年5月投入现场使用, 经过近一年的连续运行表明其性能可靠、控制准确、操作简便, 深受现场工程技术人员欢迎。图7给出了采用启发式优化设定控制与常规的DDC控制的加热炉能耗对比结

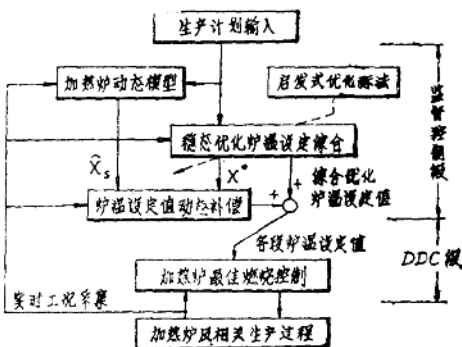


图6. 加热炉递阶计算机控制系统结构

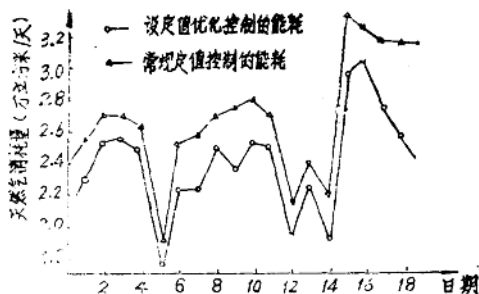


图7.优化控制与常规控制的能耗比较

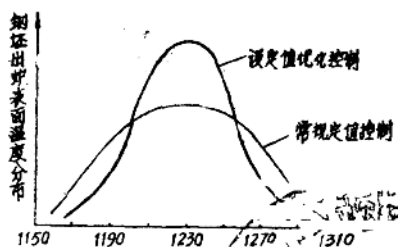


图8.优化控制与常规控制钢坯出炉表面温度的比较

果,图8是两种控制方式下钢坯加热温度的比较。根据生产现场的统计数据表明,采用加热炉的计算机优化设定值控制可降低能耗9%,降低钢坯烧损0.18%,并明显提高钢坯的加热质量,从而使该厂获得每年100万元以上的经济效益。

基于动态数学模型的启发式优化策略在加热炉控制工程中获得成功的应用,为加热炉的计算机控制开辟了一个新的途径。随着计算机科学的发展及人工智能研究的深入,启发式方法在过程控制中的应用将逐渐显示其独特的优越性。

本文的研究工作受到重庆钢铁公司的大力支持,在此表示感谢。

#### 参 考 文 献

- [1] Misaka Y. and Takahashi R. et al, Computer control of a reheating furnace at Kaahima Steel works' Hot Strip Mill, Iron and Steel Engineer, 59(1982)5, 51~55
- [2] One M. and Makino T. et al., The computer control system for a billet reheating furnace, preprints of the 8th IFAC world Congress, Kyoto, 1981, 141~146
- [3] Nilsson N., Principles of Artificial Intelligence, Tiora Publishing Co., 1980
- [4] Yang Y. and Lu Y., Development of a computer control model for slab reheating furnaces, Computer in Industry, 7(1986)2, 145~154.
- [5] J. Pearl, Heuristic search theory: Survey of recent results, Proceedings of the 7th IJCAI, Canada, 1981, 554~562.
- [6] J. Pearl, Heuristics: Intelligent Search Strategies for Computer Problem Solving, Addison-Wesley Publishing Company, 1984.
- [7] 杨永耀, 加热炉动态优化控制策略的开发, 浙江大学研究生学报, 3(1987)1, 86~93.
- [8] 浙江大学, 重庆钢铁公司, 大型板坯加热炉数学模型及计算机优化控制技术资料, 1986.

# 用卡尔曼滤波的加热炉氧量燃烧控制

李 正 庠

(重庆钢铁设计研究院)

由于轧钢厂加热炉是分段燃烧控制,但各段之间却存在着干扰,传统的做法是仅在加热炉的烟道处安装氧量浓度检测装置,因而无法知道各燃烧段的空气过剩情况。本文叙述了用卡尔曼滤波的方法来求得各燃烧段的空气过剩情况,并对每一燃烧段进行氧量控制。同时也介绍了氧量控制双交叉限幅燃烧控制相结合的控制系统。

对轧钢厂加热炉内的烟气含氧量进行控制,是节省燃料,减少金属氧化损失和环境污染的有效措施。但是,加热炉通常都是采用分段燃烧控制的方法,即分成预热段、加热段和均热段,各段都有独立的空燃比燃烧控制。这样,在下流段的烟气中就混有上流段的烟气。按过去习惯做法,氧气浓度检测装置仅安装在靠近烟道处的预热段前面或烟道入口端,这就不能正确地得到各燃烧段的空气过剩率。

为要正确地掌握各燃烧段的空气过剩率,应在每一燃烧段都设置氧气浓度检测装置。其示意图如图 1 所示。

所测得的氧气浓度  $O_a$ 、 $O_b$  和  $O_c$  分别代表均热段、加热段和预热段的烟气含氧浓

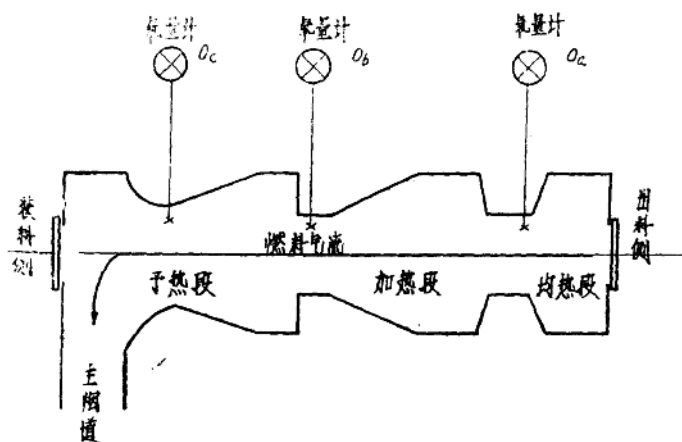


图 1 加热炉分段燃烧示意图

度，于是有

$$O_a = \frac{(\lambda - 1) \times 21\% \times A_a}{H_a} \quad (1)$$

式中  $A_a$  ——理论燃烧空气量；

$\lambda$  ——空气过剩系数；

$H_a$  ——均热段烟气量，可认为  $H_a = \alpha \lambda A_a$ ；

$\alpha$  ——烟气和燃烧空气的比例系数，在一定范围内可认为是一恒值。

于是 (1) 式成为

$$O_a = \frac{21\% A_a}{\alpha A_a} \frac{(\lambda - 1)}{\lambda} \quad (2)$$

因为  $\lambda$  一般在 1.03~1.05 范围内，所以可以近似地认为

$$\frac{\lambda - 1}{\lambda} \approx \lambda - 1$$

于是 (2) 式成为

$$O_{as} = \frac{21\%}{\alpha} (\lambda - 1) = \mu_a \quad (3)$$

$\mu_a$  可称为空气过剩率。

类似地

$$O_{bs} = \frac{\mu_a H_a}{H_a + H_b} + \frac{\mu_b H_b}{H_a + H_b} \quad (4)$$

$$O_{cs} = \frac{\mu_a H_a}{H_a + H_b + H_c} + \frac{\mu_b H_b}{H_a + H_b + H_c} + \frac{\mu_c H_c}{H_a + H_b + H_c} \quad (5)$$

式中  $\mu_b$ 、 $\mu_c$  分别为加热段和预热段的空气过剩率，

$H_b$ 、 $H_c$  分别为加热段和预热段的烟气量。

由于燃料热值的变化、炉内空气量的吸入以及下流段受上流段的干扰，(3)、(4) 和 (5) 式有必要进行修正，今引入干扰系数  $G_{aa}$ 、 $G_{ab}$ 、 $G_{bb}$ 、 $G_{bc}$ 、 $G_{ac}$  及  $G_{cc}$ ，它们分别表示各段自身干扰以及受到上流段干扰的系数。于是 (3)、(4) 和 (5) 式成为

$$O_a = \mu_a G_{aa}$$

$$O_b = \frac{\mu_a H_a G_{ab}}{H_a + H_b} + \frac{\mu_b H_b G_{bb}}{H_a + H_b} \quad (7)$$

$$O_c = \frac{\mu_a H_a G_{ac}}{H_a + H_b + H_c} + \frac{\mu_b H_b G_{bc}}{H_a + H_b + H_c} + \frac{\mu_c H_c G_{cc}}{H_a + H_b + H_c} \quad (8)$$

改写成矩阵形式

$$\begin{pmatrix} O_a \\ O_b \\ O_c \end{pmatrix}^T = \begin{pmatrix} \mu_a \\ \mu_b \\ \mu_c \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} 1 & \frac{H_a}{H_a + H_b} & \frac{H_a}{H_a + H_b + H_c} \\ 0 & \frac{H_b}{H_a + H_b} & \frac{H_b}{H_a + H_b + H_c} \\ 0 & 0 & \frac{H_c}{H_a + H_b + H_c} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} G_{aa} & G_{ab} & G_{ac} \\ 0 & G_{bb} & G_{bc} \\ 0 & 0 & G_{cc} \end{pmatrix}$$

$$\text{或 } O^T = \mu^T H G \quad (9)$$

上标号 T 表示矩阵的转置。

采用卡尔曼滤波的方法来求得随机变量矩阵  $\hat{X}$ 。卡尔曼滤波的基本公式为：

$$X(k) = A X(k-1) + W(k-1) \quad (10)$$

$$Y(k) = C X(k) + V(k) \quad (11)$$

(10) 式为系统模型，(11) 式为测量或观察模型，W 为白噪声，V 为测量噪声，k 为序列。

于是估计值为

$$\hat{G}(k) = A \hat{G}(k-1) + K(k) [O(k) - C A \hat{G}(k-1)] \quad (12)$$

式中 A 可以认为是过程的时间常数，矩阵 A 中的元素  $a_{ij}$  ( $i, j = a, b, c$ ) 的值愈大，则过程愈慢，采样时间愈长。

$$C = \mu^T H \quad (13)$$

K 为滤波器增益

$$K(k) = P_1(k) C^T [C P_1(k) C^T + R(k)]^{-1} \quad (14)$$

其中  $P_1$  为预估协方差矩阵，

$$P_1(k) = A P(k-1) A^T + Q(k-1) \quad (15)$$

(14) 式中的 R 为测量噪声方差，(15) 式中的 Q 为白噪声方差，都是随机过程的统计值。

$$R(k) = E[V(k) V^T(k)]$$

$$= E \left[ \begin{pmatrix} v_a(k) & v_b(k) & v_c(k) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_a(k) \\ v_b(k) \\ v_c(k) \end{pmatrix} \right]$$

$$= \begin{pmatrix} E v_a^2(k) & E v_a(k) v_b(k) & E v_a(k) v_c(k) \\ E v_b(k) v_a(k) & E v_b^2(k) & E v_b(k) v_c(k) \\ E v_c(k) v_a(k) & E v_c(k) v_b(k) & E v_c^2(k) \end{pmatrix}$$

$$E v_i(k) v_j(k) = 0 \quad (i \neq j)$$

[注]：文中 O、H、G、 $\mu$ 、 $\bar{X}$ 、Y、V、A、K、C、P、R、Q、W、F 为黑体字母。