



# 大型空气重介流化床逆系统控制与仿真<sup>1)</sup>

严德崑

(中国矿业大学信电学院 徐州 221008)

(E-mail: XZWangn@263.net)

**关键词** 流化床, 多变量系统, 非线性, 逆系统方法, 仿真

**中图分类号** TP391.9

## INVERTED SYSTEM CONTROL AND SIMULATION OF LARGE AIR DENSE MEDIUM FLUIDIZED BED (ADMFB)

YAN De-Kun

(Department of Automation, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008)

(E-mail: XZWangn@263.net)

**Key words** Fluidized Bed, multivariable system, nonlinearity, inverted system method, simulation

### 1 引言

我国和国外很多煤炭储藏地严重缺水,传统的湿法选煤工艺受到限制.流化态分离技术是矿物分离的一种新型高效干法分选方法.目前的研究主要在选煤行业,称之为“空气重介流化床干法选煤技术”,具有重大经济价值和广阔的应用前景,因而受到产煤大国的高度重视.我国在气-固流化床均匀稳定的理论和实验研究方面处于世界先进水平,目前正在向50吨/小时处理量的大型工业化生产系统推进,其核心设备是一台空气重介流化床分选机.分选机工业运行的关键是控制流化床的床高和密度稳定在工艺要求的设定值.现在还没有一种成熟有效的控制方法.根据机理分析,这是一个多变量非线性非自衡系统,并存在多种随机干扰,经典的非线性系统控制方法难以奏效和在线实施.近年来,非线性系统的逆系统控制方法得到了显著的发展,对于连续系统和离散系统已经获得了反馈线性化的理论分析与综合设计方法,并且很容易推广到多变量系统和在线控制实施.

本文简要介绍了空气重介流化床干法选煤的工艺过程和 multivariable 非线性系统数学模型及其离散化形式,基于逆系统方法设计了采样控制系统的极点配置控制器,最后给出了仿真结果及分析.

1) 国家“九五”攻关重点项目(95-215-03)资助

收稿日期 2000-09-05 收修改稿日期 2001-08-25

## 2 空气重介流化床干法选煤的工艺流程和机理模型

50 吨/小时处理量的分选机的大致结构如图 1 所示. 床底 10 个  $1\text{m} \times 1\text{m}$  风室鼓入压缩空气, 经过特殊的布风板减压和均匀分布, 进入分选室, 使混合加重介质膨胀形成似流体的气-固两相流化态. 混合加重介质由磁铁矿粉和煤粉按一定比例混合而成. 破碎筛选后的原煤由分选机上方加料口进入流化床以后, 比重小的精煤浮到上层, 比重大的矸石沉入下层. 横向布置、距离均匀的刮板由左右两侧链条带动循环运动, 分别将精煤和矸石从分选机前方、后方排出. 为了减少煤粉飞扬, 经分选机上方除尘口以负压抽到除尘工段处理. 混合介质随精煤和矸石一起排出过筛后, 两部分混合介质汇合到一起, 经分流后, 一部分直接返回混合介质仓; 另一部分经磁选排除部分煤粉后返回高密介质仓. 混合介质和高密介质再由分选机上方补充到流化床中循环使用. 由于途中损失, 为了维持整个系统物料平衡, 还需单独补充一些精铁矿粉.

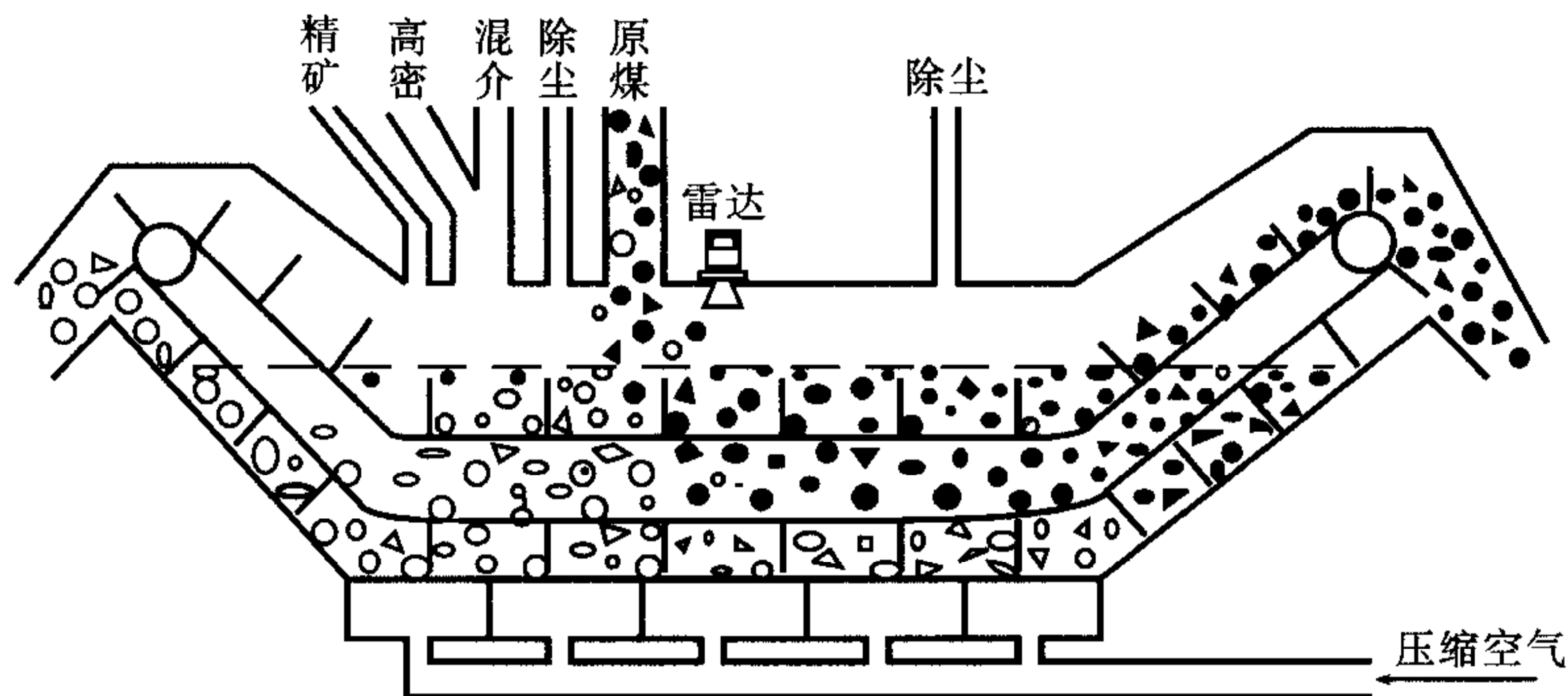


图 1 大型空气重介流化床分选机结构与生产工艺简图

流化床干法选煤分选过程正常运行的关键在于维持流化床的规定床高和流化密度. 设计要求当入选原煤为  $6 \sim 50\text{mm}$  粒级时, 床高  $H$  要在  $0.38 \sim 0.44\text{m}$  之间可调, 测量精度为  $\pm 5\text{mm}$ , 控制精度为  $\pm 10\text{mm}$ ; 密度  $\rho$  要在  $1.6 \sim 2.1\text{g}/\text{cm}^3$  之间可调, 测量精度为  $\pm 1\%$ , 控制精度为  $\pm 3\%$ .

根据流化床分选过程的工艺设计和机理分析, 得到系统模型如下<sup>[3]</sup>:

$$H'(t) = \frac{1}{A\rho(t)}(Q_1(t) + Q_2(t) - Q_3) \quad (1)$$

$$\rho'(t) = \frac{\rho(t) \cdot \left[ \frac{K_{\rho_2} - K_{\rho}}{K_{\rho_2} + 1} Q_2(t) - \frac{K_{\rho} - K_{\rho_1}}{K_{\rho_1} + 1} Q_1(t) - 0.001 K_{\rho} Q_5 \right]}{m} \quad (2)$$

其中循环混合介质添加量  $Q_1(t)$ , 吨/小时; 循环高密介质添加量  $Q_2(t)$ , 吨/小时; 混合介质的排出量  $Q_3(t)$ , 吨/小时, 假设正常生产时基本不变; 加煤量  $Q_5(t)$ , 排煤量  $Q_6(t)$ , 假设正常生产时基本相等不变; 床中的混合介质中, 磁铁矿粉与煤粉混合要求的比例为  $K_{\rho} : 1$ , 视要求的设定密度而定; 添加的混合介质和高密介质中, 磁铁矿粉与煤粉混合的实际比例分别为  $K_{\rho_1} : 1$  和  $K_{\rho_2} : 1$ ;  $A$  为流化床表面积,  $\text{m}^2$ ;  $m$  为流化床中保有的混合介质重量, 吨.

根据模型可知,流化床分选过程是两输入两输出多变量非线性时变系统.  $Q_3, Q_5, Q_6$  和风压、原煤含水量的波动造成对系统的干扰. 由仿真结果可知<sup>[3]</sup>, 系统具有非自衡特性. 模型能正确反映实际选煤过程床高和密度的变化规律, 其离散形式如下:

$$H_{k+1} = H_k + \frac{T}{A\rho_k}(Q_{1k} + Q_{2k} - Q_3) \quad (3)$$

$$\rho_{k+1} = \rho_k \left[ 1 + \frac{T}{m}(K_2 Q_{2k} - K_1 Q_{1k} - 0.001 K_\rho Q_5) \right] \quad (4)$$

其中  $T$  为采样周期, 小时;  $K_1 = \frac{K_{\rho_1} - K_{\rho_1}}{K_{\rho_1} + 1}$ ,  $K_2 = \frac{K_{\rho_2} - K_{\rho_2}}{K_{\rho_2} + 1}$ .

### 3 非线性离散系统的逆系统方法的综合

在非线性系统的反馈线性化控制理论中, 一种不同于微分几何方法的逆系统方法在近十几年来得到了显著的发展<sup>[1]</sup>. 通过引入  $\alpha$ -阶积分逆、伪线性系统等概念, 形成反馈线性化理论和设计方法. 它直接以一般形式的非线性系统作为研究对象, 适用于连续系统、离散系统、分布参数系统和多变量系统等更大范围. 例如, 对于单变量离散系统  $\Sigma: u_k \rightarrow y_k$ , 设其由差分方程

$$y_{k+n} = f[y_{k+n-1}, y_{k+n-2}, \dots, y_k, u_{k+m}, u_{k+m-1}, \dots, u_k] \quad (5)$$

表示, 并且具有初始条件  $Y_0 = [y_0, y_1, \dots, y_{n-1}]$ ,  $U_0 = [u_0, u_1, \dots, u_{m-1}]$ . 如果可以从式(5)解出  $u_{k+m}$  的显式表示

$$u_{k+m} = g[y_{k+n}, y_{k+n-1}, \dots, y_k, u_{k+m-1}, \dots, u_k] \quad (6)$$

那么, 若将式(6)作为差分方程式, 并赋予和式(5)同样的初始条件, 则式(6)即可表示系统  $\Sigma$  的逆系统  $\Pi: y_k \rightarrow u_k$  的方程. 在式(6)中, 记  $y_{k+n} = \phi_k$ , 则可得到系统  $\Sigma$  的  $n$ -阶延迟逆系统  $\Pi_n: \phi_k \rightarrow u_k$  的方程如下:

$$u_{k+m} = g[\phi_k, y_{k+n-1}, \dots, y_k, u_{k+m-1}, \dots, u_k] \quad (7)$$

其中相应地有  $y_{k+n-1} = z^{-1}\phi$ ,  $y_{k+n-2} = z^{-2}\phi$ ,  $\dots$ ,  $y_k = z^{-n}\phi$ , 这里  $z^{-1}$  为单位延迟算子. 并且式(7)也具有和式(5)相同的初始条件. 将式(7)所示的  $n$ -阶延迟逆系统串联到原系统之前, 即得到离散的伪线性系统, 满足

$$y_{k+n} = \phi_k \quad (8)$$

然后, 将  $n$ -阶延迟逆系统中的变量  $y_k, y_{k+1}, \dots, y_{k+n-1}$  由原系统中的相应变量的反馈代替, 即可进一步构成具有反馈结构的离散伪线性系统, 如图 2 中由  $\phi_k$  到  $y_k$  的框图部分.

现将上述离散伪线性系统作为被控对象, 可进一步按线性控制理论进行控制系统的设

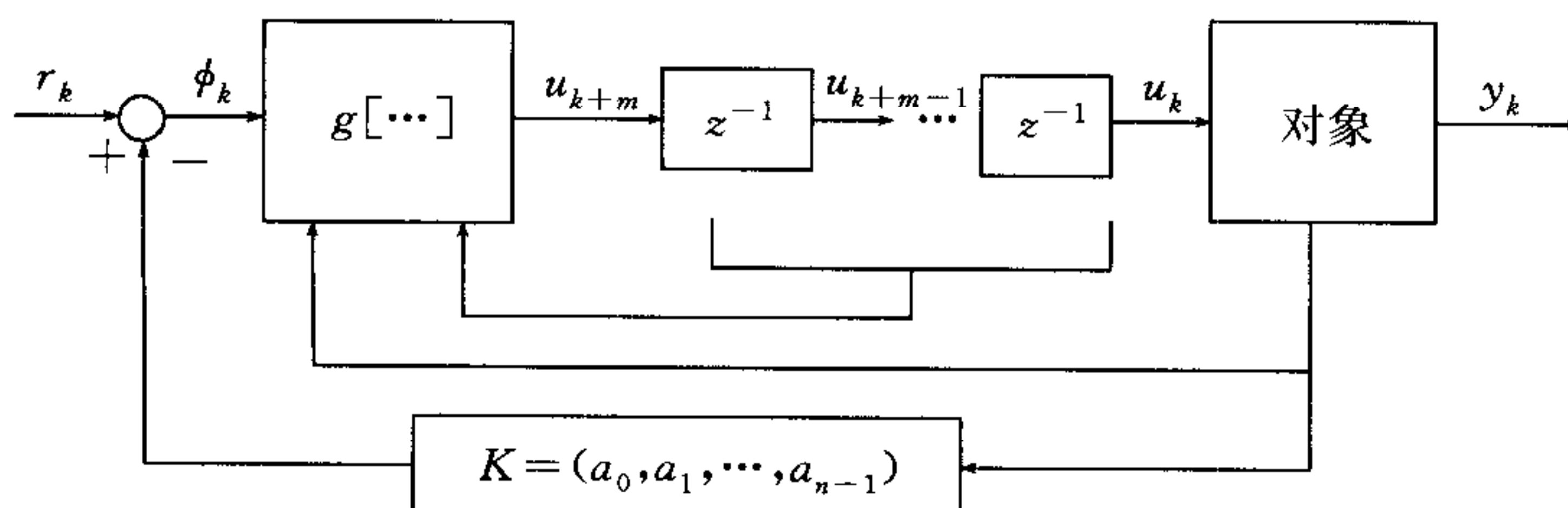


图 2 单变量离散非线性系统的逆系统控制结构

计. 设对控制系统的动态特性的要求(综合目标)满足方程

$$y_{k+n} + a_{n-1}y_{k+n-1} + \dots + a_0y_k = \beta r_k \quad (9)$$

其中  $r_k$  为闭环控制系统的参考输入. 那么, 只要选择伪线性系统的反馈控制律为

$$\phi_k = \beta r_k - [a_0y_k + a_1y_{k+1} + \dots + a_{n-1}y_{k+n-1}] \quad (10)$$

即可. 系数  $a_0, a_1, \dots, a_{n-1}, \beta$  可以根据各种不同原则选取而实现极点配置、二次型指标最优等设计方法.

按上述设计过程构成的控制系统如图 2 所示. 对于多变量系统, 只要把变量和参数换成向量即可.

## 4 分选过程的逆系统控制方法设计

由式(3)和(4), 得到逆系统如下:

$$Q_{1k} + Q_{2k} = \frac{A\rho_k(H_{k+1} - H_k)}{T} + Q_3 \quad (11)$$

$$-K_1Q_{1k} + K_2Q_{2k} = \frac{m}{T} \left( \frac{\rho_{k+1}}{\rho_k} - 1 \right) + 0.001K_\rho Q_5 \quad (12)$$

令  $\phi_{1k} = H_{k+1}$ ,  $\phi_{2k} = \rho_{k+1}$ , 代入式(11)和(12), 得到原系统(3)和(4)的一阶积分逆系统. 再将其串联到原系统之前, 即得到离散的伪线性系统, 满足

$$Y_{k+1} = \begin{bmatrix} H_{k+1} \\ \rho_{k+1} \end{bmatrix} = \Phi_{k+1} = \begin{bmatrix} \phi_{1k} \\ \phi_{2k} \end{bmatrix} \quad (13)$$

设综合目标为

$$Y_{k+1} + (\alpha_{h0} \quad \alpha_{\rho 0}) \cdot Y_k = \begin{bmatrix} \beta_h r_{hk} \\ \beta_\rho r_{\rho k} \end{bmatrix} \quad (14)$$

于是

$$\begin{bmatrix} \phi_{hk} \\ \phi_{\rho k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta_h r_{hk} \\ \beta_\rho r_{\rho k} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \alpha_{h0} H_k \\ \alpha_{\rho 0} \rho_k \end{bmatrix} \quad (15)$$

按极点配置, 考虑到流化床内介质扩散速度、刮板运动速度、加料量限幅和上升速度, 根据多次仿真结果比较, 取  $\alpha_{h0} = -0.4$ ,  $\alpha_{\rho 0} = -0.4$ ,  $\beta_h = \beta_\rho = 0.6$ .

## 5 仿真结果及分析

$A = 11\text{m}^2$ ,  $m = 8.6\text{T}$ ,  $H_0 = 0.38\text{m}$ ,  $\rho_0 = 2.00\text{T/m}^3$ ,  $K_\rho = r_\rho + 3.0$ ,  $K_{\rho_1} = \rho_k + 3.0$ , 初值取为  $5.00$ ,  $K_{\rho_2} = 19.0$ . 取阶跃输入为  $r_h = 0.39\text{m}$ ,  $r_\rho = 2.025\text{T/m}^3$ , 应用 MATLAB 仿真语言工具 SIMULINK 编制了仿真框图(略). 仿真结果如图 3 所示.

1) 密度调节速度较慢, 是因为其调节量根据工艺设计限幅所致. 为了尽量节约磁铁矿粉的消耗量, 密度设定值一次不要变化大于百分之一; 入选煤筛选限下率和含水率要严格控制, 尽量减少进入流化床的煤粉; 另外, 要及时调节好混合介质的分流, 使返回的高密介质能够满足密度调节的要求.

2) 床高调节速度比较适中. 由于流化床的特殊工艺, 投入的介质要及时被流化和扩散,

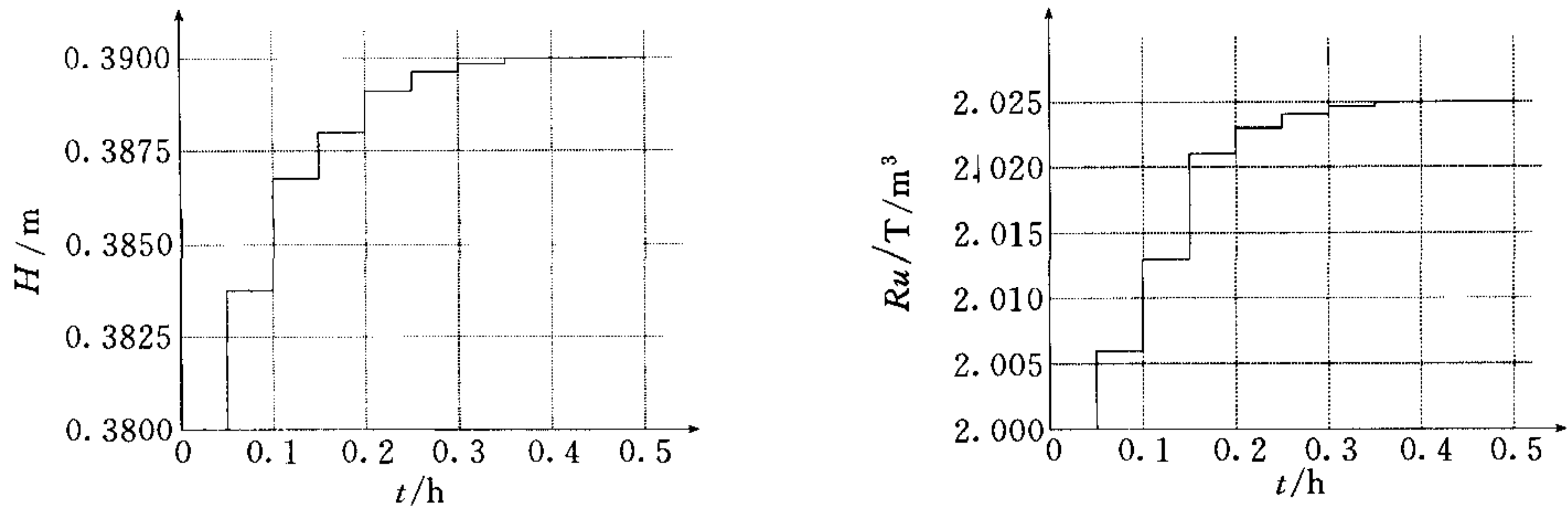


图 3 床高和密度阶跃响应仿真结果

所以调节量也要合理限幅。

3) 逆系统方法是解决多变量非线性系统控制的一种先进的理论方法, 它的物理概念清晰, 适用面宽, 简便易行. 只要被控对象的模型比较准确, 精心设计好控制器参数, 可以取得良好的控制效果. 但是, 实际过程控制对象建立的模型的结构或参数存在偏差, 随机干扰普遍存在, 往往成为随机系统. 逆系统方法的鲁棒性有待进一步深入研究.

4) 流化床分选过程是一个物理过程, 机理模型的建立充分考虑了各种操作因素, 因而模型结构是完备的, 只是其中的模型参数并非恒值, 存在一定的变化范围, 有待实际生产过程中测试. 仿真过程中, 根据工艺设计曾选取几组参数进行闭环控制系统的仿真, 效果是满意的. 实际生产过程中, 一方面要严格工艺操作, 另一方面要认真测试参数. 根据控制效果, 可以修改控制器参数. 这是伪线性系统本身的反馈控制问题, 还可以增加一个外环消除静差, 增强控制系统的鲁棒性.

### 参 考 文 献

- 1 李春文, 冯元琨. 多变量非线性控制的逆系统方法. 北京: 清华大学出版社, 1991
- 2 曾 凡, 胡永平. 矿物加工颗粒学. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1995
- 3 严德崑. 大型空气重介流化床机理建模与仿真. 系统仿真学报, 2001, 13(3): 342~343

**严德崑** 1968年清华大学毕业, 中国矿业大学研究员, 部重点实验室主任, 中国自动化学会理事. 研究兴趣为自适应控制、智能控制及人工神经网络.