



滚筒造粒系统的动态矩阵控制研究

王新杰¹, 丁海登¹, 李 伟¹, 樊 跃²

(1. 郑州轻工业学院 机电工程学院, 河南 郑州 450002; 2. 郑州铁路局 郑州北车站, 河南 郑州 450053)

摘要: 将滚筒造粒过程简化为一个双输入双输出系统, 建立系统的传递函数矩阵模型; 针对造粒过程多变量、大滞后的特性, 提出利用动态矩阵控制算法实现自动化控制; 给出工艺过程操作方案, 利用 MATLAB 软件中的模型预测控制工具箱进行动态矩阵控制算法的参数设计和仿真。结果表明, 该方法能够根据给定的输出变量设定轨迹, 协调多个操作变量, 使得系统输出有效跟踪设定值。

关键词: 滚筒造粒; 动态矩阵控制; 仿真

中图分类号: TQ051.9

文献标志码: A

文章编号: 1008-5548(2014)05-0006-04

Research on Dynamic Matrix Control of Drum Granulation System

WANG Xinjie¹, DING Haideng¹, LI Wei¹, FAN Yue²

(1. Mechanical and Electrical Engineering Institute, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China; 2. Zhengzhou North Station, Zhengzhou Railway Bureau, Zhengzhou 450053, China)

Abstract: By simplifying the drum granulation process as a two-input-two-output system, the transfer function matrix model was established. To realize automation control of drum granulation process, a dynamic matrix control algorithm was proposed for its multi-variable long time-delay characteristics. Dynamic matrix control algorithm was designed and simulated by model predictive control tool box of MATLAB software for the given operation scheme. The results show that this method can optimize the manipulated variable based on the given reference output, so that the output trajectory can be tracked effectively.

Key words: drum granulation; dynamic matrix control; simulation

滚筒造粒技术广泛应用于食品、化工、制药等行业, 目前该设备运行过程的自动化程度极低, 造粒生产主要依赖人工经验, 效率低, 耗能高。动态矩阵控制(DMC)通过预测模型、滚动优化和反馈校正 3 个基本

环节, 可以直接处理大滞后、多变量过程, 控制结构本身具有一定的隐式解耦功能, 适用于造粒过程的控制。先进控制方法可优化操作变量, 提高生产效率, 提高颗粒产品质量。目前已经开发出多种先进控制软件, 在石油化工业有成功的应用先例^[1]。针对造粒过程先进控制领域, 澳大利亚昆士兰大学对滚筒造粒过程基于模型的控制开展了大量研究和实验工作^[2]。Ramachandran Rohit 等^[3]研究了基于复杂机理模型的造粒过程优化控制问题。目前, 国内外关于先进控制的推广和应用的深度和广度均存在较大差距。本文将滚筒造粒过程简化为一个双输入双输出系统, 建立系统的传递函数矩阵模型; 提出利用动态矩阵控制算法实现自动化控制, 以克服传统控制方法难以适应多变量、大滞后过程控制的问题; 给出工艺过程操作方案, 利用 MATLAB 软件中的模型预测控制工具箱进行仿真。

1 滚筒造粒工艺过程控制方案

大型滚筒造粒设备的造粒过程如图 1 所示。滚筒以一定的转速转动, 轴向倾斜固定角度, 其具体数值需根据物料情况、滚筒转速、产品参数等确定, 一般为 2~10°, 一侧通过定量螺旋加料机加料, 同时输出端的筛分返料返回加料端再次造粒。粘结剂喷液方案如图 2 所示。喷液系统主要由储液罐、压力控制阀、流量控制阀和喷液泵组成, 压力控制阀可采用溢流阀限定最大喷液压力。根据滚筒长度和喷洒面积可设置多个喷头, 所有喷头的液压相同, 各喷头流量可分别控制。这种方案可有效提高过程的安全性和可控性, 满足造粒过程实时控制的硬件要求。

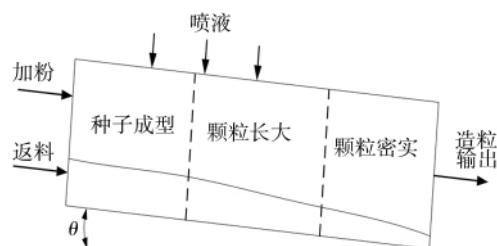


图 1 滚筒造粒过程

Fig. 1 Drum granulation process

收稿日期: 2013-11-14, 修回日期: 2013-12-10。

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 项目, 编号: SS2012AA063103。

第一作者简介: 王新杰(1960—), 女, 博士, 教授, 研究方向为智能机器人技术及动力学分析与综合。E-mail: weibo1991@126.com。

通信作者简介: 丁海登(1988—), 男, 硕士研究生, 研究方向为机电一体化控制。电话: 18039100095, E-mail: haideng8803@163.com。

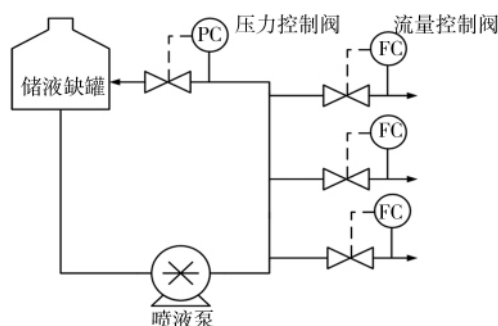


图2 粘结剂喷液方案

Fig. 2 Scheme of binder spray

实验研究中,将滚筒转速依据填充量调整到最佳转速后保持不变,滚筒倾角调整后固定,保证粉体物料在滚筒中的停留时间相对稳定。假设造粒过程中粘结剂相关参数始终保持不变,颗粒产品质量的控制主要依靠动态调整入口加料速率和分布喷头的喷液速率。为了简化变量个数,便于实验研究,多个喷头的喷液速率视为同比率变化,即看作1个变量。

实际造粒生产存在的主要问题包括:1)造粒机的实际生产能力远低于理论的设计生产能力;2)颗粒尺寸分布范围宽,筛分返料比率大,生产效率低;3)连续生产过程不稳定,经常需要停机调整;4)生产过程粉尘污染严重。上述问题可以从设备、工艺和控制3个方面解决,本文中从工艺和控制角度考虑,利用先进控制算法实现生产过程的高效、连续、稳定的运行。

2 滚筒造粒过程的动态矩阵控制

2.1 动态矩阵控制方案

动态矩阵控制采用对象的阶跃响应模型,这在造粒装置上易于通过阶跃测试获得,且算法运算量少,鲁棒性较强。控制系统硬件平台主要由 IPC-610 系列研华工控机、西门子 S7-300 系列可编程逻辑控制器(PLC)以及触摸屏等组成,通过过程监控软件 WinCC 和数值计算软件 MATLAB 之间的动态数据交换 (DDE) 通信技术,把采集的过程数据导入 MATLAB 工具箱进行模型辨识和算法执行,再把运算结果返回 WinCC 通过 PLC 作用给执行器件,从而实现动态矩阵控制算法在实验装置上的实验研究^[4]。

颗粒尺寸分布参数和体积密度是颗粒产品的2个重要质量指标,把滚筒转速依据弗劳德数调整到最佳转速,造粒系统简化为一个双输入双输出系统,以中位粒径 d_{50} (累积体积分数为 50% 时对应的颗粒粒径)和颗粒体积密度 ρ_v 为被控制变量,操作变量为

喷液速率 $\dot{m}_b$ 和 $\dot{m}_s$ 加粉速率。总体控制方案如图3所示。其中 Y_1 、 Y_2 为期望输出值, u_1 、 u_2 为优化作用输出, y_1 、 y_2 为实际输出值。粒度检测采用在线数字图像检测技术实现^[5],颗粒体积密度采用带有采样装置的 Dens-M 型颗粒体积密度检测仪实时反馈实际输出值。

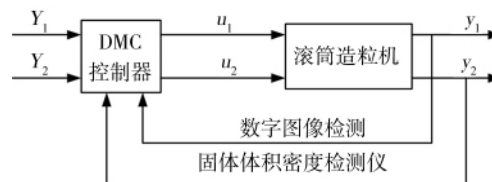


图3 动态矩阵控制方案

Fig. 3 Scheme of dynamic matrix control

2.2 预测模型

造粒过程对各个操作变量的响应特性可以采用一阶惯性加纯滞后环节近似表示^[3],模型结构为

$$g_{i,j}(s) = e^{-\tau_{i,j}s} \frac{K_{i,j}}{T_{i,j}s + 1}, \quad (1)$$

式中: s 为拉普拉斯变换中的复变数, t^{-1} ; $\tau_{i,j}$ 为纯滞后;下标 i, j 表示传递函数矩阵元素的位置; $K_{i,j}$ 为过程增益,表示输入对输出稳态值的影响程度; $T_{i,j}$ 为惯性环节时间常数,表示对象受到阶跃干扰后,被控量达到新稳态值的快速程度。

首先测得每一输出对每一输入的阶跃响应,通过实验获得阶跃测试实验数据。待辨识参数 $\tau_{i,j}$ 、 $K_{i,j}$ 、 $T_{i,j}$ 通过被控颗粒质量参数随加粉速率和喷液速率的阶跃响应飞升曲线或最小二乘法辨识求得。模型的输入、输出量以偏离期望值偏差的形式定义,表达式如下:

$$\begin{cases} u_1 = \dot{m}_b - \dot{m}_b^0, \\ u_2 = \dot{m}_s - \dot{m}_s^0, \\ y_1 = d_{50} - d_{50}^0, \\ y_2 = \rho_v - \rho_v^0, \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\dot{m}_s$ 为加粉速率, g/h; $\dot{m}_b$ 为粘结剂喷液速率, g/h; d_{50} 为颗粒中位粒径, mm; ρ_v 为颗粒体积密度, kg/m³; 右上角的 0 代表设定的期望值。输入约束为 $n_{\min} \leq n_i \leq n_{\max}$, 输出约束为 $y_{\min} \leq y_i \leq y_{\max}$, $i = 1, 2$ 。其中, n_i 、 y_i 分别对应第 i 个输入量和输出量,带下标 max、min 的量分别为对应量的约束上、下边界。

仿真所用的双输入、双输出系统传递函数模型为

$$\begin{bmatrix} \hat{y}_1 \\ \hat{y}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11}(s) & g_{12}(s) \\ g_{21}(s) & g_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{u}_1 \\ \hat{u}_2 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\text{即} \begin{bmatrix} \hat{d}_{50} \\ \hat{\rho}_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{5.4}{12s+1}e^{-3s} & \frac{0.27}{3s+1}e^{-3s} \\ \frac{10.6}{8s+1}e^{-3s} & \frac{0.5}{4s+1}e^{-3s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{m}_b \\ \hat{m}_s \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中上标 $\wedge$ 表示对应的量为模型预测值。

2.3 滚动优化

最优控制律由二次型性能指标确定,在优化的喷液速率与加粉速率的共同作用下,实现目标变量在未来 P 个时刻跟踪被控量设定值参考轨迹。此性能指标可表示为

$$\min J(k) = \|W(k) - \hat{y}_{PM}(k)\|_Q^2 + \|\Delta U_M(k)\|_R^2, \quad (5)$$

$$\text{式中: } W(k) = \begin{bmatrix} w_1(k) \\ w_2(k) \end{bmatrix}, w_i(k) = \begin{bmatrix} w_i(k+1) \\ \vdots \\ w_i(k+P) \end{bmatrix}, i=1, 2, w_i(k) \text{ 表示 } k$$

$$\text{时刻对应输出量 } y_i \text{ 的期望值; } \Delta U_M(k) = \begin{bmatrix} \Delta u(k) \\ \vdots \\ \Delta u(k+M-1) \end{bmatrix},$$

$\Delta u(k) = [\Delta u_1(k), \Delta u_2(k)]$ 为优化的控制作用增量序列,其中的元素表示控制作用增量在控制时域内不同时刻的优化值;误差权矩阵, $Q = \text{block-diag}(Q_1, Q_2)$ 其中 B_{block} 为矩阵块, $Q_i = \text{diag}[q_i(1), \dots, q_i(P)]$, Q_i 中的元素对应 y_i 在不同时刻的跟踪误差; $R = \text{block-diag}(R_1, R_2)$ 为控制权矩阵,其中, $R_j = \text{diag}[r_j(1), \dots, r_j(M)]$, $j=1, 2$, R_j 中的元素对应 u_j 在不同时刻增量的抑制; P 为优化时域; M 为控制时域。矩阵 Q, R 中的元素都有实际物理意义,有利于控制系统的整定。

在每个采样瞬间,DMC滚动优化在每个优化时域内计算1次,并把计算结果的第1个控制量序列 $[\Delta u_1(k), \Delta u_2(k)]$ 发送给执行装置,下一个采样时刻,继续向前推移重复进行优化运算。与传统的优化控制相比,这种方法更易于实现装置的实际优化效果。

2.4 反馈校正

在 k 时刻实施控制后,把 $k+1$ 时刻的预测值与实际输出值比较,并构成误差向量

$$e(k+1) = \begin{bmatrix} e_1(k+1) \\ e_2(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1(k+1) - \hat{y}_{1,1}(k+1 | k) \\ y_2(k+1) - \hat{y}_{2,1}(k+1 | k) \end{bmatrix}, i=1, 2, \quad (6)$$

式中: $y_i(k+1)$ 为 $k+1$ 时刻的实际输出值, $\hat{y}_{i,1}(k+1 | k)$ 为 k 时刻控制作用实施后,输出量在 $k+1$ 时刻的预测值。

未来的误差由式(6)以加权方法预测得到,以补偿模型预测值,得到校正后的预测向量

$$\hat{y}_{\text{cor}}(k+1) = \hat{y}_N(k) + H e(k+1), \quad (7)$$

$$\text{式中: } H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix}, h_{st} = \begin{bmatrix} h_{st}(1) \\ \vdots \\ h_{st}(N) \end{bmatrix}, s=1, 2, t=1, 2; \hat{y}_N(k) \text{ 为}$$

校正前的输出预测值;下标 N 表示阶跃响应系数模型

长度, N_1 表示第1个控制增量作用后的输出预测值, h_{st} 为误差校正向量。

3 仿真研究

MATLAB 中的模型预测控制(简称 MPC)工具箱提供了一系列用于模型预测控制的分析、设计和仿真函数,可以方便地进行模型辨识、模型转换,控制算法的设计、仿真和系统性能分析。针对造粒系统的动态特性设计仿真参数。

3.1 滞后的处理

对原 DMC 算法参数进行适当修正,即可直接用于处理大滞后造粒过程。假设系统滞后的拍数为 l ,修正前、后的部分参数对比如表1所示。

表1 有、无时间滞后的 DMC 参数对比

Tab. 1 Comparison of parameters between presence or absence of time delay

参数	滞后 l 拍	无时滞
动态矩阵	$A := [O_{bM}, A]^T$	$A := [A_1, \dots, A_P]^T$
模型向量	$a = [0, \dots, 0, a_1, \dots, a_N]^T$	$a = [a_1, \dots, a_N]^T$
预测时域	$P+l$	P
误差权矩阵	$\text{diag}(O_{bd}, Q)$	Q

3.2 仿真设置与结果分析

MPC 控制器的主要参数选择如下: 采样周期 $T=30$ s; 输入权值 $q_1=q_2=0.1$; 输出权值 $w_1=w_2=0.1$; 预测时域 $P=10$; 控制时域 $M=2$ 。

假定颗粒平均粒径的初始值为 1.5 mm, 体积密度的初始值为 450 kg/m³, 控制系统的输出、输入变量变化曲线如图4所示。从图4(a)中可以看出, 时间为 10 min 时, 中位粒径变化为 2 mm, 体积密度变化为 500 kg/m³; 动态矩阵控制可以实现无超调的控制, 10 min 内可使造粒过程达到新的稳态值。从图4(b)中可以看出, 控制系统会根据设定轨迹的变化趋势, 自动协调加粉速率和喷液速率, 跟踪设定轨迹, 变量的变化平缓, 达到新的稳态值时, 粘结剂喷液速率减小了 300 g/h, 加粉速率增大了 1 500 g/h。

4 结论

1) 提出利用动态矩阵控制方法克服传统控制方法难以适应多变量、大滞后过程控制的问题, 以实现连续滚筒造粒过程的自动化控制。

2) 将滚筒造粒过程简化为双输入双输出系统, 建立了以粘结剂喷液速率、加粉速率为操作变量, 颗粒中位粒径、体积密度为被控变量的传递函数矩阵模型。

3) 仿真结果表明, 动态矩阵控制方法能根据给定

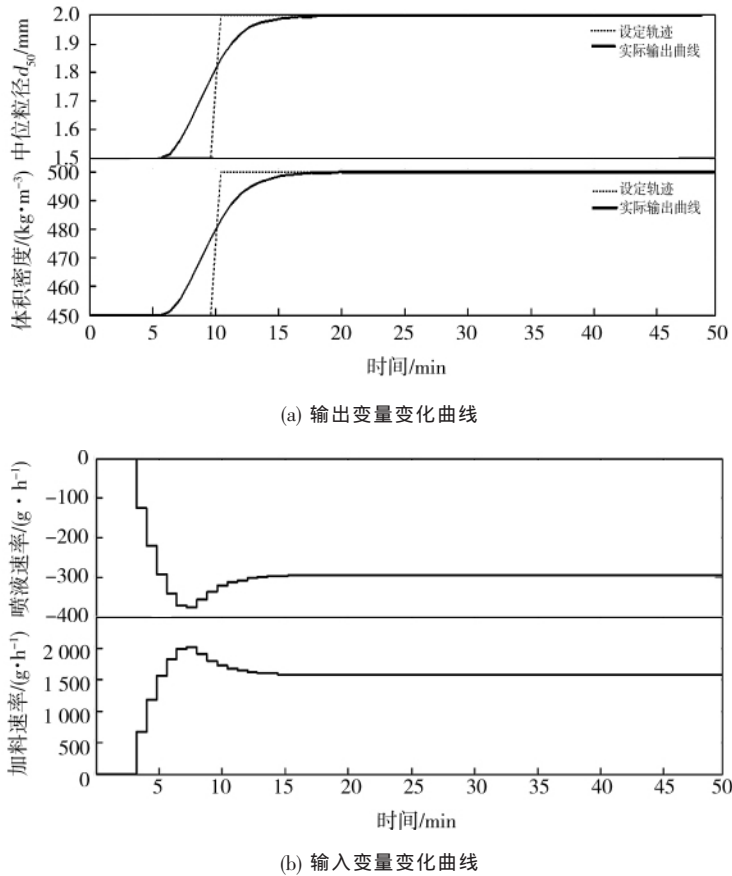


图 4 控制系统输出、输入变量变化曲线

Fig. 4 Variation curves of outputs and inputs in control system

的输出轨迹,提前协调多个操作变量,使实际输出紧密跟踪设定值的变化。

参考文献 (References):

[1] QIN S J, BADGWELL T A. A survey of industrial model predictive control technology[J]. Control Engineering Practice, 2003, 11(7): 733-764.

[2] GLASER T, SANDERS C F W, WANG F Y, et al. Model predictive control of continuous drum granulation[J]. Journal of Process Control,

2009, 19 (4): 615-622.

[3] RAMACHANDRAN R, CHAUDHURY A. Model-based design and control of a continuous drum granulation process[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2011, 90 (8): 1063-1073.

[4] 云雪峰. 基于 WinCC 和 Matlab 的预测控制器设计[C] // 中国计量协会冶金分会. 中国计量协会冶金分会 2009 年年会论文集, 2009: 465-467.

[5] 陈震, 陈鹿民. 基于数字图像分析的颗粒生长监测技术[J]. 中国粉体技术, 2013, 19 (2): 7-10.

本期广告目次

彩页

- 封面 济南微纳颗粒仪器股份有限公司
- 封二 广州市博勒飞粘度计质构仪技术服务有限公司
- 封三 福建龙岩市亿丰粉碎机械有限公司
- 封四 丹东百特仪器有限公司
- 插一 浙江丰利粉碎设备有限公司
- 插二 桂林恒达矿山机械有限公司
- 插三 潍坊正远粉体工程设备有限公司
- 插四 插五 福建丰力机械科技有限公司
- 插六 山东华特磁电科技股份有限公司
- 插七 耐驰(上海)机械仪器有限公司
- 插八 江阴市启泰非金属工程有限公司

- 插九 盐城吉达机械制造有限公司
- 插十 长沙高新开发区万华粉体设备有限公司
- 插十一 河南黎明重工科技股份有限公司
- 插十二 合肥中亚建材装备有限责任公司

单色整版

- 插一 浙江力普粉碎设备有限公司
- 插二 沈阳飞机研究所粉体公司
- 插三 大连德宝力机械制造有限公司
- 插四 南京南大有限公司
- 插五 上海细创粉体装备有限公司