

文章编号: 1004-0609(2006)02-0346-05

基于 MATLAB/Simulink 的粒度分离过程计算机仿真^①

杨英杰, 邓会勇, 李 侠

(中南大学 资源加工与生物工程学院, 长沙 410083)

摘 要: 以仿真振动筛分过程为例, 采用先进的科学计算软件 MATLAB/Simulink 对粒度分离过程进行计算机仿真。建立了振动筛分过程仿真模型, 介绍了仿真所用的数学模型及主要 Simulink 模块, 并进行了筛分过程的计算机仿真。仿真结果与实测结果非常吻合, 筛上产品、筛下产品的仿真值与实测值相对误差分别为 -4.26% 和 1.09%。仿真实验表明振动筛分过程仿真模型准确地反映了其筛分过程, 论证了采用 MATLAB/Simulink 对粒度分离过程进行计算机仿真的可行性。

关键词: 粒度分离; 振动筛; 仿真; Simulink; 数学模型

中图分类号: TD 921.3; TP 337

文献标识码: A

Simulation of particle separation process based on MATLAB/Simulink

YANG Ying-jie, DENG Hu-yong, LI Xia

(School of Minerals Processing and Bioengineering,
Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The particle separation process based on high-performance MATLAB/Simulink software was simulated, with an example of simulating the sieving process of vibrating screen. The simulation model of the sieving process of vibrating screen (SMSPVS) was set up, the mathematic models and main Simulink blocks adopted were introduced. The simulation experiment shows that the simulation result is close to the same with actual result, the relative errors between simulation result and actual result of oversize and undersize are -4.26% and 1.09%, respectively. The process of sieving is accurately simulated by SMSPVS, hence the feasibility of building computer simulation model based on Simulink is demonstrated.

Key words: particle separation; vibrating screen; simulation; Simulink; mathematic model

矿物资源是影响国民经济发展及国防建设的重要战略资源, 随着开采品位的下降及需求量的不断增长, 需要处理的矿量日益增加, 因此在矿物加工过程中引进先进的科学技术和高效设备势在必行。计算机仿真具有无破坏性, 可多次重复, 安全、经济、可控、不受气候条件和场地空间限制等其它技术所无法比拟的特点, 它为工艺流程优化^[1, 2]、控制方案优化^[3, 4]以及生产指标预测^[5, 6]等问题提供

了一种高效、经济的手段。近年来许多研究人员对矿物加工过程计算机仿真做了大量研究^[7-12], 在矿物加工过程中应用计算机仿真必将对传统的矿产资源开发过程产生深刻的变革。

MATLAB 自 1984 年由美国 Mathworks 公司推出以来, 现已成为国际公认的最优秀的科技应用软件。Simulink 是 MATLAB 的一个分支产品, 主要用来实现对工程问题的模型化和动态仿真。现在

① 收稿日期: 2005-05-28; 修订日期: 2005-10-31

作者简介: 杨英杰(1955-), 男, 副教授

通讯作者: 杨英杰, 副教授, 电话: 0731-6635099; E-mail: yjyangcsu@126.com

Simulink 已经广泛应用于信号控制、通信设计、动力系统、金融财会及生物医学等各个领域仿真^[13, 14]。粒度分离是矿物加工过程的一个极其重要的环节, 选矿厂常用的粒度分离方法有筛分和分级两大类, 常用的筛分设备有振动筛、固定筛等。本文作者以仿真振动筛分过程为例, 将仿真操作平台 Simulink 引入到粒度分离过程的计算机仿真中, 进行了相关仿真研究。

1 振动筛分过程仿真模型的建立

1.1 振动筛仿真模型

MATLAB/Simulink 为系统仿真提供了一个功能强大、操作简便的可视化仿真操作平台, 在 Simulink 环境下建模仿真就如同搭积木一样, 可将科研人员从繁重的编程中解脱出来。在系统仿真领域, 国外很多高校在教学和科研中都将其作为首选的计算机工具。本文建立的基于 Simulink 的振动筛分过程仿真模型的核心部分是振动筛仿真模型, 振动筛仿真模型(图 1)由折算效率 C_i 子系统、分离粒度 d_{50} 子系统等 6 个子系统以及 7 个 Constant 模块、3 个 Input 模块、5 个 Output 模块、2 个 Gain 模块、一个 Demux 模块组成。

计算机仿真的三个基本要素是系统、数学模型和计算机, 针对不同的应用场合可采用相应的数学模型, 以增强整个仿真系统的适应性。以折算效率模型为基础, 分离粒度 d_{50} 等为辅助模型的振动筛模型具有模型概念清楚, 参数容易建立, 适合于在生产实际中使用等优点^[15], 所以振动筛仿真模型采用这个数学模型, 即折算效率模型:

$$C_i = 1 - \exp \left[-0.693 \left(\frac{\bar{x}_i}{d_{50}} \right)^m \right]$$

式中 C_i 为第 i 粒级的折算效率, $\bar{x}_i = \sqrt{x_i x_{i+1}}$ 是第 i 粒级的几何平均粒径, mm, m 是反映折算效率曲线陡度的参数; d_{50} 为 $C_i = 0.5$ 的粒度, mm, 仿真时其值由分离粒度 d_{50} 子系统提供。

1.1.1 分离粒度 d_{50} 子系统

分离粒度 d_{50} 子系统(图 2)封装了影响振动筛筛分效果的 7 个重要变量, 它们也是仿真筛分过程的主要输入参数。这 7 个变量包括 5 个设计变量, 筛丝直径、筛子孔径、筛网面积、有效筛分面积系数以及筛子层数; 1 个操作变量, 筛子的倾角; 1 个描述矿石性质的变量, 物料的松散密度。

分离粒度 d_{50} 子系统采用的数学模型为分离粒度 d_{50} 模型, 即:

$$d_{50} = h_T \left[\frac{q}{k_1 k_2 k_3 k_4 k_5 k_6 k_7} \right]^{-0.148}$$

式中 $h_T = (h + d) \cos \theta - d$

$$q = M_t F - h_T / \varphi A$$
$$k_1 = \begin{cases} 12.1286P^{0.3162} - 10.2991 & (P < 50.8) \\ 0.3388P + 14.4122 & (P \geq 50.8) \end{cases}$$
$$k_2 = \begin{cases} -0.012Q + 1.6 & (Q \leq 87) \\ 0.0425Q + 4.275 & (Q > 87) \end{cases}$$
$$k_3 = \begin{cases} 0.012R + 0.7 & (R \leq 30) \\ 0.1528R^{0.564} & (30 < R \leq 55) \\ 0.0061R^{1.37} & (55 < R < 80) \\ 0.05R - 1.5 & (R \geq 80) \end{cases}$$
$$k_4 = 0.844 \left[1 - \frac{S}{100} \right]^{3.453}$$
$$k_5 = 1.1 - 0.1l$$

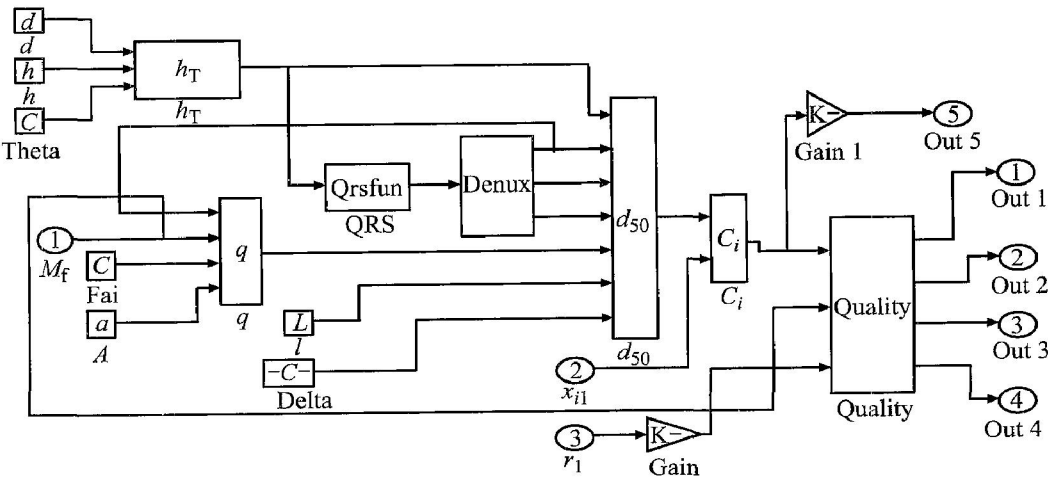
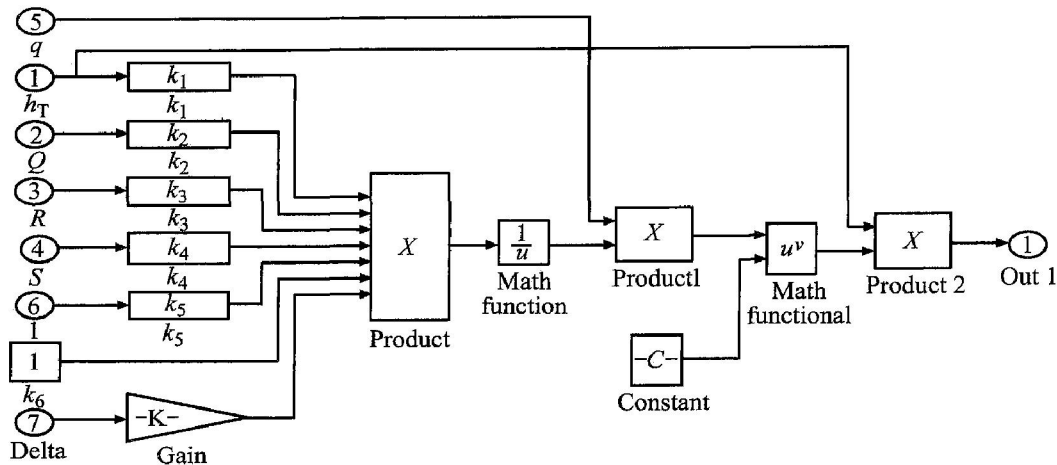


图 1 振动筛仿真模型

Fig. 1 Simulation model of vibrating screen

图 2 分离粒度 d_{50} 子系统Fig. 2 d_{50} subsystem

$$k_6 = 1$$

$$k_7 = \delta_0 / 1.602$$

式中 h_T 为有效筛孔孔径, mm; q 是按小于有效筛孔孔径计算的单位筛网面积处理量, $t/(h \cdot m^2)$; k_1 为基本处理能力修正系数; k_2 为给矿中大于筛孔物料修正系数; k_3 为给矿中小于半筛孔物料修正系数; k_4 为给矿中近筛孔物料修正系数; k_5 为筛子所在层次修正系数; k_6 为筛分方法(干筛或湿筛)修正系数; k_7 为物料松散密度修正系数; M_f 为筛子的处理量, t/h ; F_{-h_T} 为给矿中粒度小于有效筛孔孔径的物料比例, %; P 为是通过筛孔的粒径, mm; Q 为给矿中粒度大于有效筛孔孔径的物料的比例, %; R 为给矿中粒度小于半有效筛孔孔径的物料所占的比例, %; S 为给矿中近筛孔物料所占的比例, %; h 为筛子孔径, mm; d 为筛丝直径, mm; θ 为筛子的倾角, ($^\circ$); φ 为有效筛分面积系数; A 为筛网面积, m^2 ; l 是振动筛所在的层次; δ_0 是物料的松散密度, t/m^3 。最后 7 个变量为振动筛仿真模型的封装参数。

1.1.2 Simulink 模块在 d_{50} 子系统中的应用

1) Product 模块:

此模块位于 Simulink 模块集的 Math Operations 模块组内, 它的功能是对输入进行乘法或求倒数运算, 然后输出。此模块的两个主要参数为 Number of inputs 和 Multiplication, 前者用来设定参与运算的乘数的个数; 后者用来设定乘数的类型: 标量, 或矢量的元素 (Element-wise) 或矩阵 (Matrix)。分离粒度 d_{50} 子系统用此模块实现 7 个修正系数相乘, 其参数分别设定为 7 和 Element-wise。

2) Math Function 模块:

此模块同样位于 Simulink 模块集的 Math Operations 模块组内, 它可以用来执行许多通用数学函数, 它可以有多个输入变量, 输出既可以为标量也可以为向量。此模块通过设定参数 Function 来选择运算的函数, 其中多种函数可供选择, 如对数、自然对数、倒数、平方、平方根、余数、幂函数等。分离粒度 d_{50} 子系统有两处用到此模块, 其 Function 参数分别为 reciprocal 和 pow, 以实现相应的求倒数和幂运算功能。

1.2 振动筛分过程仿真模型

1.2.1 振动筛分过程仿真模型在 Simulink 中的表示

振动筛分过程仿真模型由振动筛仿真模型子系统、输入部分、输出部分以及一个用来装载数据的 LoadData 子系统组成, 如图 3 所示。输入部分由 3 个 Constant 模块组成, 其参数分别为粒级 M_f , 平均粒径 x_i 及给矿产品粒度分布 r 。输出部分由 5 个 To Workspace 模块组成。

1.2.2 LoadData 子系统的建立及应用

LoadData 子系统是一个自定义的功能模块, 用来载入仿真数据和传递参数。LoadData 模块调用了一个 M 文件, 此文件保存了振动筛仿真模型子系统封装的参数值和输入部分的参数值。复杂的、大型的仿真系统需要设置大量的仿真参数, 若对取值不变的参数, 每次仿真都需一个个重复设置, 这样仅仅是设置参数的工作量就相当大, 而且容易因输入错误而导致仿真结果不正确。而用数据输入子系统 LoadData 一次性批量输入数据不仅方

便, 而且减少了错误发生的概率。由于 M 文件中所创建的变量是 MATLAB 工作空间中的变量, 当程序运行结束后, 这些变量存贮在工作空间中, 其它的程序或仿真模型可以直接调用这些变量, 以起到传递参数的作用。

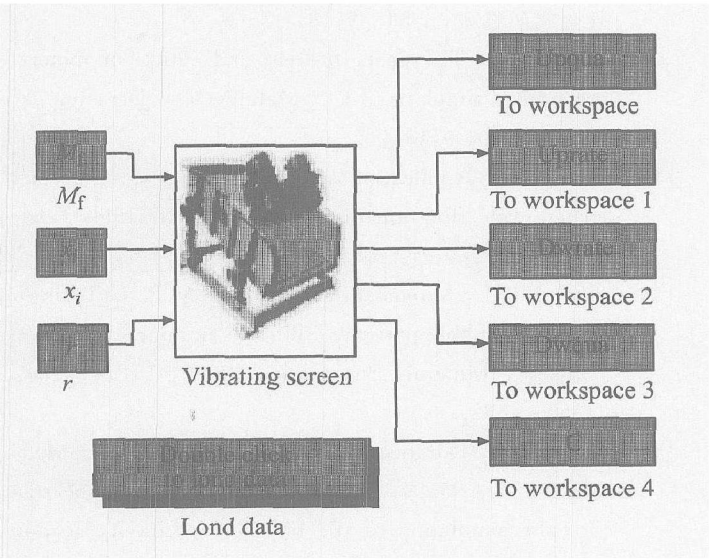


图 3 振动筛分过程仿真模型

Fig. 3 Simulation model of sieving process of vibrating screen

LoadData 功能模块实现的过程如下:

1) 在 Simulink 的 Ports & Subsystems 模块库中把 Subsystem 模块拖曳到模型窗口, 用鼠标双击 Subsystem 模块打开该子系统, 删除所有元件, 得到一个没有输入输出的子系统, 并将该子系统命名为 LoadData 模块。

2) 在 MATLAB 的命令窗口应用 path= gcb ('LoadDdata') 命令获得 LoadDdata 模块的路径, 应用 set_param(path, 'OpenFcn', 'ParaValues') 命令使 LoadData 模块的 OpenFcn 属性为 ParaValues.m, ParaValues.m 即是保存了仿真系统参数值的 M 文件。

2 仿真实验

2.1 参数值输入

振动筛分过程仿真模型的输入参数包括两个部分, 一部分是振动筛分过程仿真模型输入部分的参数(表 1), 即 M_f , x_i 和 r , 它们主要涉及到给料量和粒度分布; 另一部分为振动筛仿真模型的封装参数(表 2)。将表中参数及其对应值以 MATLAB 变量的方式保存到 ParaValues.m 的相应变量中即可对振动筛分过程进行计算机仿真。

表 1 振动筛分过程仿真模型输入部分的参数

Table 1 Parameters of SMSPV S' input part

Class No.	Aperture size/ mm	Mean size/ mm	Size distribution/ %
1	15.9 ~ 18.8	17.289	6.32
2	12.7 ~ 15.9	14.210	14.00
3	9.53 ~ 12.7	11.011	20.42
4	7.94 ~ 9.53	8.699	6.84
5	6.68 ~ 7.94	7.283	7.11
6	4.70 ~ 6.68	5.603	10.74
7	3.33 ~ 4.70	3.956	7.42
8	2.36 ~ 3.33	2.803	5.68
9	< 2.36	1.180	21.47

Capacity of vibrating screen Is 103 t/ h.

表 2 振动筛仿真模型的封装参数

Table 2 Encapsulated parameters of vibrating screen simulation model

h	d	θ	φ	A	l	δ_0
15.90	4.88	20	1	5.56	1	1.60

2.2 仿真结果

筛上及筛下产品的累积产率仿真值与实测值的比较如图 4 所示。图中曲线 1, 2 分别为仿真所得负累积产率和正累积产率的拟和曲线, 曲线附近的点分别为对应的实测结果。此外, 仿真所得筛上产品、筛下产品的总质量分别为 20.105 t/h 和 82.895 t/h, 相应实测值分别为 21 t/h 和 82 t/h。筛上产品、筛下产品的仿真值与实测值绝对误差分

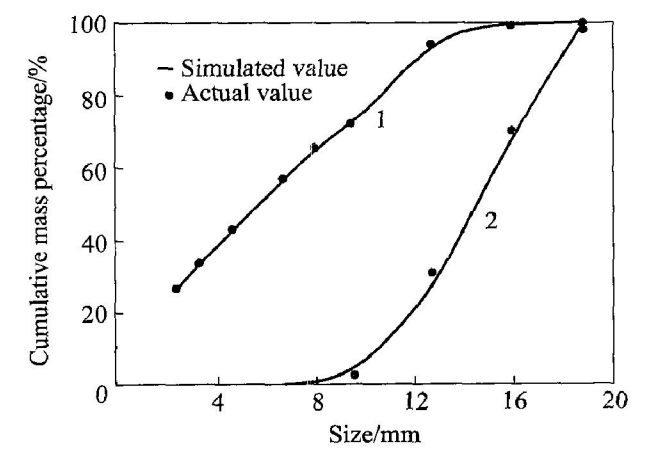


图 4 累积产率仿真值与实测值的比较

Fig. 4 Comparison between simulated and actual results of cumulative mass percentage

1—Below riddler; 2—Above riddler

别为 -0.895 t/h 和 0.895 t/h , 相对误差分别为 -4.26% 和 1.09% 。仿真结果与实测结果非常吻合。

3 结论

1) 以 MATLAB/Simulink 为开发环境, 可方便、有效地建立振动筛分过程仿真模型。

2) 振动筛分过程仿真模型准确地反映了振动筛的筛分过程, 计算机仿真结果与实测结果非常吻合。

REFERENCES

- [1] 蒋炳炎, 王 麟, 谢 磊, 等. 金属粉末注射成形仿真分析的喂料粘度模型参数[J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(3): 429 - 434.
JIANG Bing-yan, WANG Lin, XIE Lei, et al. Viscosity model parameters fitting of feedstock in MIM simulation and analysis[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005, 15(3): 429 - 434.
- [2] Fernandes C, Peres A E C. Optimization of the grinding circuit at Arafertil, Brazil[J]. Minerals Engineering, 1999, 12(8): 969 - 984.
- [3] Munoz C, Cipriano A. An integrated system for supervision and economic optimal control of mineral processing plants[J]. Minerals Engineering, 1999, 12(6): 627 - 643.
- [4] Sosa-Blanco C, Hodouin D, Bazin C, et al. Integrated simulation of grinding and flotation application to a lead-silver ore[J]. Minerals Engineering, 1999, 12(8): 949 - 967.
- [5] 马爱纯, 周子民, 李旺兴. 氧化铝熟料窑喷射干燥段参数的仿真优化[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(1): 138 - 141.
MA Ai-chun, ZHOU Zi-min, LI Wang-xing. Parameters optimization of spray drier zone in alumina clinker rotary kiln[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(1): 138 - 141.
- [6] Evertsson C M. Modeling of flow in cone crushers[J]. Minerals Engineering, 1999, 12(12): 1479 - 1499.
- [7] Ferreira J P, Loveday B K. An improved model for simulation of flotation circuits[J]. Minerals Engineering, 2000, 13(14 - 15): 1441 - 1453.
- [8] Lynch A J. 选矿模拟的过去、现在和未来[J]. 译. 国外金属矿选矿, 2000, 9(18): 2 - 6.
Lynch A J. The past, present and future of mineral processing simulation[J]. Metallic Ore Dressing Abroad, 2000, 9(18): 2 - 6.
- [9] Cilek E C. Application of neural networks to predict locked cycle flotation test results[J]. Minerals Engineering, 2002, 15: 1095 - 1104.
- [10] Koh P T L, Manickam M, Schwarz M P. CFD simulation of bubble-particles collisions in mineral flotation cells[J]. Minerals Engineering, 2000, 13(14 - 15): 1455 - 1463.
- [11] Brochot S, Durance M V, Villeneuve J, et al. Modeling of the bioleaching of sulphide ores: application for the simulation of the bioleaching/gravity section of the Kasere Cobalt Company Ltd process plant[J]. Minerals Engineering, 2003, 17: 253 - 260.
- [12] Yi Liu, Spencer S. Dynamic simulation of grinding circuits[J]. Minerals Engineering, 2004, 17: 1189 - 1198.
- [13] Ricci F, Hoang L H. Modeling and simulation of FPGA-based variable-speed drives using Simulink[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2003, 63(3 - 5): 183 - 195.
- [14] Lim C L, Jones N B, Spurgeon S K, et al. Modeling of knee joint muscles during the swing phase of gait: a forward dynamics approach using MATLAB/Simulink[J]. Simulation Modelling Practice & Theory, 2003, 11(2): 91 - 107.
- [15] 尹 蒂, 李松仁. 选矿数学模型[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1993. 123 - 125.
YIN Di, LI Song-ren. The Mathematic Model of Mineral Processing[M]. Changsha: Central South University of Technology Press, 1993. 123 - 125.

(编辑 何学锋)