

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.08.002

平面圆筛机的筛分过程研究和模型构建^{*}

朱贺嘉¹, 赵章风^{1*}, 姜晓亮²

(1. 浙江工业大学 特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室, 浙江 杭州 310014;

2. 浙江上洋机械有限公司, 浙江 衢州 324000)

摘要:针对圆筛机的筛分效率低的问题,对圆筛机筛分过程进行了研究。首先考虑单颗粒茶叶,研究了茶叶在筛面上的运动,求得单颗粒茶叶的透筛概率;然后在单颗粒茶叶的基础上考虑茶叶层厚度的影响,在 Matlab/Simulink 中建立了圆筛机筛分流量模型。该模型能用于计算茶叶的输入/输出情况以及筛分效率。利用该流量模型对不同给料量和筛机转速下的筛分过程进行了仿真,得到了圆筛机的最佳转速和进料范围。研究表明,该模型能有效地模拟茶叶的筛分过程,为使筛分效率达到 85% 以上,筛机转速应控制在 230 r/min ~ 235 r/min 的范围内,而筛机进料量应控制在 300 kg/h ~ 600 kg/h 的范围内。

关键词:平面圆筛机;流量模型;筛分效率;Matlab/Simulink

中图分类号:TH122;TS272.3

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)08-1021-06

Screen process of plane-surface round sifter and construction of the simulation model

ZHU He-jia¹, ZHAO Zhang-feng¹, JIANG Xiao-liang²

(1. Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Processing Technology,
Ministry of Education, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China;

2. Zhejiang Shangyang Machinery Co., Ltd., Quzhou 324000, China)

Abstract: In order to solve the problems of low efficiency in tea plane-surface round sifter screening process, the motion path of the single-particle tea on the screen was analysed. By considering all positions where tea-leaves penetrate through the mesh, probability of tea-leaves going through the screen was obtained. Based on these and the influence of leaf layer's thickness, a sifter machine model was developed by solving the penetrating rate differential equation to simulate the screen process in assistance of Matlab/Simulink. The simulation result shows screen efficiency varies with running rate and feeding amount of the machine. To achieve high screen efficiency, screen rate should be kept in range of 230 r/min ~ 235 r/min and feed amount should be restricted between 300 kg/h and 600 kg/h.

Key words: tea plane-surface round sifter; screen model; screen effect; Matlab/Simulink

0 引 言

筛分是茶叶精制加工中的一道重要工序,茶叶流量和筛机转速对筛分质量有很大的影响^[1]。平面圆筛机是完成筛分工序的机种之一,通过筛网的转动使茶叶在筛网上做周期的圆周运动,尺寸较小的茶叶便有一定的几率透过筛网,从而区分茶叶的大小,便于后续

工序的进一步分选。目前,圆筛机的设计和使用都是依靠经验完成的,对此还没有一条比较成熟的理论指导。

国内外的一些学者均通过离散元数值仿真研究了圆筛机或类似筛机的筛分过程。J Li 和 PW Cleary 等^[2-3]利用盘元和球元模拟了颗粒群的筛分行为,得到了一些颗粒的筛分规律;赵章风^[4]对圆筛机的筛分原理进行了研究,并使用离散软件对茶叶筛分过程进行了模拟。

收稿日期:2015-03-30

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2014BAD06B06);浙江省重大科技专项资助项目(2013C02024-2)

作者简介:朱贺嘉(1989-),男,浙江绍兴人,主要从事制茶设备和生产线方面的研究。E-mail:1114768991@qq.com

通信联系人:赵章风,男,博士,副教授,硕士生导师。E-mail:i12fly@163.com

本研究在此基础上,对圆筛机进行进一步研究,并建立 Simulink 模型,得到转速、流量与筛分效率的关系。

1 圆筛机原理及单颗粒茶叶运动

平面圆筛机的结构如图 1 所示。

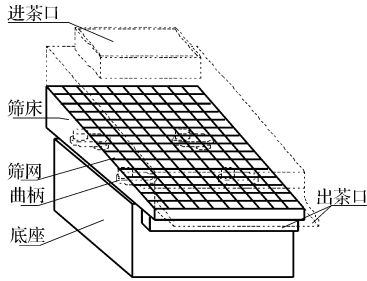


图 1 茶叶平面圆筛机的结构

茶叶由进茶口进入筛床,筛床由上至下放置四面不同筛网,且筛孔尺寸逐渐变小。筛床由 4 个安装在底座上的曲轴支撑,当曲轴旋转时,筛床以及筛网在水平面上做轨迹为圆周的刚体平动^[5]。本研究定义圆筛机转速即为筛网转速 ω_1 或 n_1 ,两者有转化关系 $\omega_1 = 2\pi n_1/60$,圆周运动半径为 A_1 。在运动过程中,茶叶由于惯性,与筛网产生相对运动,较小的茶叶透过筛孔落至筛下,至下一层筛网继续透筛,尺寸较大的茶叶留在筛网上。筛网与水平面有一倾角,在筛分的过程中,茶叶由高处逐渐运动至较低的出茶口出茶。这样依次通过筛孔由大到小的几层筛网,茶叶被分为大小不同的几个规格,分别由不同出茶口出茶^[6]。本研究定义由进茶口到出茶口的方向为筛网纵向,垂直于筛网纵向的方向定义为筛网横向。

茶叶将随着筛网运动,但是由于茶叶惯性,茶叶和筛网有相对运动。汪晓华^[7]通过对茶叶的受力和运动进行分析,得到了茶叶在筛网上的相对滑动轨迹如图 2 所示。

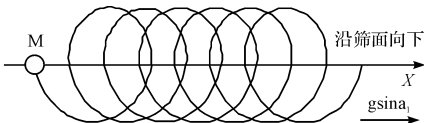


图 2 茶叶在筛网的运动轨迹

茶叶在筛面上做由上至下的螺旋运动。在一个周期内,茶叶不仅沿筛面向下滑,也会沿筛面向上滑动。前半周期,当茶叶沿筛面向下滑时, $\omega_1 t \in [0, \pi)$,建立坐标系如图 3 所示。

茶叶做螺旋运动,其相对于筛网的角速度等于筛机转速 ω_1 ,茶叶的运动表达式为:

$$\begin{cases} s_{1x} = r(1 - \cos\omega_1 t) + \frac{g\sin\alpha_1}{2\omega_1^2}(\omega_1 t)^2 \\ s_{1y} = -r\sin\omega_1 t \end{cases} \quad (1)$$

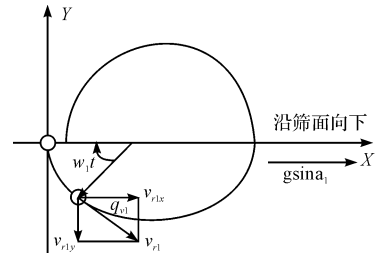


图 3 茶叶的轨迹

v_1 —茶叶相对筛网运动的速度; v_{1x}, v_{1y} —相对速度在 X, Y 轴的分量大小; θ_{v1} — v_{1x} 与 v_1 的夹角

式中: s_{1x}, s_{1y} —茶叶在 X, Y 方向上的相对运动位移; α_1 —筛网与水平面的夹角,即筛网作圆周运动的半径, $r = A_1 \cos\alpha_1 \sqrt{1 - (fg/A_1\omega_1^2 - f\tan\alpha_1)}$; μ —茶叶与筛网的摩擦系数。

后半周期,当茶叶沿筛面向上滑时, $\omega_1 t \in [\pi, 2\pi]$,此时茶叶的运动表达式为:

$$\begin{cases} s_{1x} = r(1 - \cos\omega_1 t) + \frac{g\sin\alpha_1}{\omega_1^2} \left(\pi^2 + \frac{\omega_1^2 t^2}{2} - \pi\omega_1 t \right) \\ s_{1y} = -r\sin\omega_1 t \end{cases} \quad (2)$$

茶叶的运动周期 $T_1 = 2\pi/\omega_1$,根据式(2),可算出茶叶在周期内沿 X 方向前进的距离 s_{1m} 和平均速度 v_{1m} :

$$\begin{cases} s_{1m} = \frac{g\sin\alpha_1 \pi^2}{\omega_1^2} \\ v_{1m} = \frac{s_{1m}}{T_1} = \frac{g\sin\alpha_1 \pi}{2\omega_1} \end{cases} \quad (3)$$

茶叶在筛网上受到多个力的作用,随着圆筛机转速改变,茶叶并不能始终保持滑动状态,如果筛机转速太慢,茶叶可能与筛面保持静止;如果筛机转速太快,茶叶可能被抛离筛面。为了使茶叶在筛面上始终保持相对滑动,圆筛机转速应满足以下条件:

$$\frac{g(\mu\cos\alpha_1 + \sin\alpha_1)}{\cos\alpha_1 + \mu\sin\alpha_1} < A_1\omega_1^2 < g\cot\alpha_1 \quad (4)$$

2 茶叶透筛模型及平均透筛率

2.1 茶叶的透筛模型

茶叶透过筛网的临界情况如图 4 所示。茶叶在离开左边的筛丝后作只受重力的抛物线运动。当茶叶相对于筛网运动速度较快时,茶叶质心落在右边筛丝上方,茶叶无法落入筛孔内;当茶叶的运动速度较慢时,茶叶质心落在右边筛丝下方,茶叶将落入筛孔内。

将式(1,2)对时间求导可得到式(5,6):

$$\begin{cases} v_{1x} = r\omega_1 \sin\omega_1 t + g\sin\alpha_1 t \\ v_{1y} = -r\omega_1 \cos\omega_1 t \end{cases} \quad (5)$$

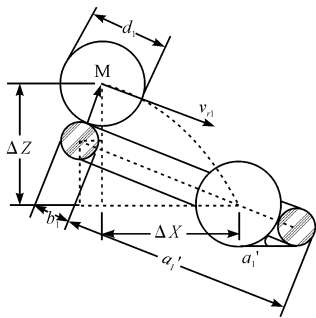


图 4 茶叶向下滑动透筛的临界状态

$$\begin{cases} v_{r1x} = r\omega_1 \sin\omega_1 t + g \sin\alpha_1 \left(t - \frac{\pi}{\omega_1} \right) \\ v_{r1y} = -r\omega_1 \cos\omega_1 t \end{cases} \quad (6)$$

$$\theta_{v1} = \arctan \left| \frac{v_{r1y}}{v_{r1x}} \right| \quad (7)$$

由于 θ_{v1} 的存在,某个固定时刻茶叶在穿过筛网时轨迹并不是平行于筛丝,同时,茶叶在图左边筛丝的位置具有不确定性,可能出现的 3 种情况如图 5 所示。

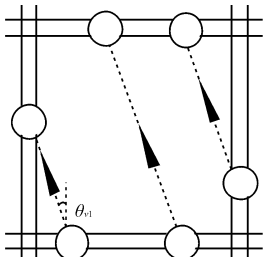


图 5 茶叶透筛时的路径

现本研究取茶叶在筛网上运动轨迹中的某个时间点 t_n ,可以根据式(5)或式(6)求得 θ_{v1} 和相对速度 v_{r1} 的大小。为了分析方便,本研究将图 5 顺时针旋转一个角度 θ_{v1} ,翻转后的透筛路径如图 6 所示。将筛网的边缘投影至坐标系 U 轴上,投影边缘点记为原点 O 和 u_3 。图 6 中,通过将茶叶投影至 OU 轴上,其坐标设为 u 。随着茶叶位置 u 的变动,茶叶在透筛时需飞跃的距离 a'_1 也将随之变化:

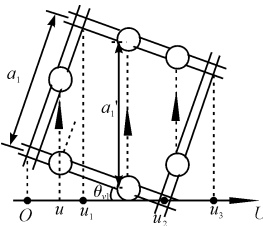


图 6 翻转后的透筛路径

a_1 —筛孔的边长; a'_1 —茶叶在透筛需飞跃的距离

$$a'_1 = \begin{cases} \frac{u}{\cos\theta_{v1} \sin\theta_{v1}} & u \in [0, u_1] \\ \frac{a_1}{\cos\theta_{v1}} & u \in [u_1, u_2] \\ (u_3 - u)(\cot\theta_{v1} + \tan\theta_{v1}) & u \in [u_2, u_3] \end{cases} \quad (8)$$

式中: $u_1 = a_1 \sin\theta_{v1}$, $u_2 = a_1 \cos\theta_{v1}$, $u_3 = a_1 (\sin\theta_{v1} + \cos\theta_{v1})$ 。

茶叶颗粒沿筛面向下滑动时,即 $\omega_1 t \in [0, \pi)$,图 4 表明了茶叶的能否透筛的临界状态。其中, $\alpha'_1 = \arccos(\sin\alpha'_1 \cos\theta_{v1})$,可得其临界状态时运动方程式为:

$$\begin{cases} \Delta Z = \left(a'_1 - \frac{d}{2} + \frac{b}{2} \right) \sin\alpha'_1 + \frac{d+b}{2} \cos\alpha'_1 \\ \Delta X = \left(a'_1 - \frac{d}{2} + \frac{b}{2} \right) \cos\alpha'_1 - \frac{d+b}{2} \sin\alpha'_1 \end{cases} \quad (9)$$

假设茶叶进行斜抛时,从脱离左筛丝到飞至右筛丝的时间为 t_f ,在这段时间内,茶叶下落的距离为 $\Delta Z'$:

$$\begin{cases} t_f = \frac{\Delta X}{v_{r1} \cos\alpha'_1} \\ \Delta Z' = v_{r1} \sin\alpha'_1 t_f + \frac{1}{2} g t_f^2 \end{cases} \quad (10)$$

通过比较 ΔZ 和 $\Delta Z'$ 的相对大小可以判定茶叶能否落入筛孔内。如果 $\Delta Z > \Delta Z'$,那么茶叶将无法透筛;如果 $\Delta Z \leq \Delta Z'$,那么茶叶将落至右筛丝下,顺利透筛。

茶叶沿筛面向上滑动时,即 $\omega_1 t \in [\pi, 2\pi)$ 时,临界状态如图 7 所示。茶叶透筛时的临界状况有所不同。

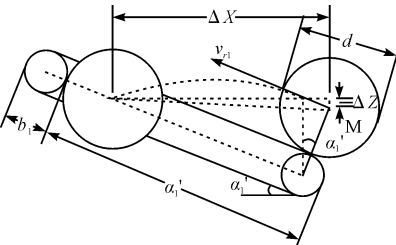


图 7 茶叶向上滑动透筛的临界状态

临界状态时运动方程式为:

$$\begin{cases} \Delta Z = \left(a'_1 - \frac{d}{2} + \frac{b_1}{2} \right) \sin\alpha'_1 - \frac{d+b_1}{2} \cos\alpha'_1 \\ \Delta X = \left(a'_1 - \frac{d}{2} + \frac{b_1}{2} \right) \cos\alpha'_1 + \frac{d+b_1}{2} \sin\alpha'_1 \end{cases} \quad (11)$$

茶叶飞跃时间 t_f 和下落距离 $\Delta Z'$ 为:

$$\begin{cases} t_f = \frac{\Delta X}{v_{r1} \cos\alpha'_1} \\ \Delta Z' = v_{r1} \sin\alpha'_1 t_f - \frac{1}{2} g t_f^2 \end{cases} \quad (12)$$

同样,通过比较 ΔZ 和 $\Delta Z'$ 的相对大小可以判定茶叶能否落入筛孔内。如果 $\Delta Z > \Delta Z'$,那么茶叶将无法透筛,如果 $\Delta Z \leq \Delta Z'$,那么茶叶将落至左筛丝下顺利透筛。

通过计算 U 轴上区间 $[0, u_3]$ 内各点的透筛情况,可以得到一个由可透筛点组成的区间 K ,区间内各点位置对应的茶叶均能透筛,记区间 K 的长度为 l_k ,则 t_n

时刻茶叶的透筛率 p_1 可用下式计算:

$$p_1 = \frac{l_k}{u_3}$$

(13)

l_k 与 u_3 均随着 θ_{e1} 变化而变化,而 θ_{e1} 在运动周期 T_1 内不断变化,因此一个周期内的平均透筛率才能衡量茶叶的透筛能力的大小。

$$p_{a1} = \frac{\int_0^{T_1} p_1 dt}{T_1}$$

(14)

2.2 茶叶透筛率的分析

对于某一型号的筛机,筛孔尺寸是固定的,茶叶的透筛率与茶叶大小以及茶叶与筛网的相对速度 v_{r1} 有关,而 v_{r1} 则与筛机转速 n_1 或 ω_1 相关。在生产中,筛机转速可以通过电机来调节,而茶叶由于大小不同导致透筛率变化正是筛分的基本原理,因此,研究在不同转速下各种尺寸茶叶的透筛率大小关系十分重要。

根据第 2 节计算茶叶的平均透筛率,茶叶的尺寸 d_1 分别为 3 mm、4 mm、5 mm、6 mm、7 mm、8 mm,筛机偏心距 $A_1 = 30$ mm,筛网倾角 $\alpha_1 = 6^\circ$,茶叶与筛网的摩擦系数 $\mu = 0.6$,由式(4)可算得筛机转速 ω_1 的取值范围为 14.7 rad/s ~ 55.7 rad/s,转化为 n_1 约为 140 r/min ~ 532 r/min。筛网取 2 目筛,筛孔边长 $a_1 = 8$ mm,筛丝直径 $b_1 = 1$ mm。

笔者利用 Matlab 对各尺寸茶叶透筛率进行计算,其结果如图 8 所示。

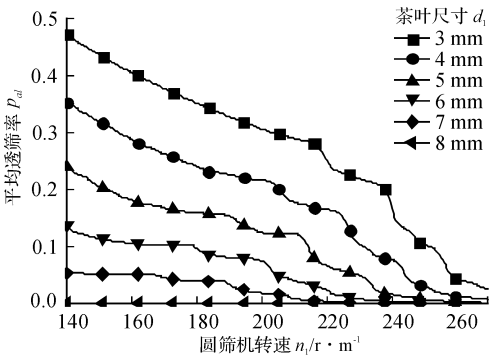


图 8 各尺寸茶叶的透筛率与转速的关系

随着转速增加,茶叶在筛网上的相对运动速度变大,在筛孔上的飞行轨迹逐渐变平,向重力方向下降的趋势逐渐变小,透筛率变小。当转速大于 260 r/min 时,各尺寸茶叶的透筛率均趋向于零。为了将尺寸为 3 mm、4 mm、5 mm 和 6 mm、7 mm、8 mm 的茶叶区分开来,根据图 8,筛机转速应初步控制在 220 r/min ~ 240 r/min 的范围内。

3 茶叶圆筛机模型的构建

3.1 茶叶群筛分过程方程

单个茶叶的透筛率 p_{a1} 不能直接用于计算筛机中

茶叶群的透筛过程。茶叶群从入茶到出茶,尺寸较小的茶叶不断落入筛下,筛网上的茶叶的质量逐渐减小,其减少的速度与茶叶透筛率和茶叶在筛网上的滑移平均速度成正比,其关系可用下式表示^[8]:

$$\frac{dW}{dt} = - \frac{k \times p_{a1} \times v_{r1a}}{n_l}$$

(15)

式中: W —筛网上的某尺寸茶叶的质量; k ——常数,值由实验测得; p_{a1} —该尺寸茶叶的平均透筛率; v_{r1a} —茶叶在筛面上的平均相对速度; n_l —筛网上茶叶层数, $n_l = n_1/b_{tea}$, (其中: n_1 —筛网上茶叶层厚度, b_{tea} —单片茶叶的厚度)。

式(15)中,等号右边部分即为筛上茶质量减小的速度。

v_{r1a} 反映了茶叶在筛网上运动时,单位时间内滑过的筛孔个数,筛孔个数越多,茶叶透筛的可能性越大。 n_l 为筛网上茶叶重叠的层数,只有最下层茶叶能与筛网直接接触,有透筛的可能性,对于特定质量的茶叶,茶叶在筛网上铺散越开,茶叶层越少,茶叶透筛越快;茶叶铺散越狭窄,茶叶层越多,茶叶透筛越慢。

3.2 茶叶圆筛机参数的确立及模型的构建

本研究利用 Matlab/Simulink 对圆筛机运行过程进行编程建模。该模型的输入变量为 6 种尺寸茶叶的进茶量、机器转速,输出结果为筛上茶和筛下茶的出茶量,对出茶量中各种茶叶进行统计可以计算出茶叶的筛净率和误筛率。在计算过程中使用到的参数如表 1 所示,程序计算流程如图 9 所示。

表 1 圆筛机模型的参数及其取值

参数	值	参数	值
筛网倾角 α_1	6	筛机转速 n_1	200 ~ 240
$/(^{\circ})$		$/(r \cdot \min^{-1})$	
偏心距 A_1	30	茶叶容重 ρ	212.85
$/mm$		$/(kg \cdot m^{-3})$	
筛孔尺寸 a_1	8	茶叶尺寸 d_1	3、4、5、6、7、8
$/mm$		$/mm$	
筛丝直径 b_1	1	茶叶厚度 b_{tea}	0.5
$/mm$		$/mm$	
筛床尺寸	1 500 × 800	茶叶流量	800
$/mm$		$/(kg \cdot h^{-1})$	
筛网动摩擦系数 μ	0.6	筛网转速	220
		$/(r \cdot \min^{-1})$	

该程序可以计算圆筛机的输入输出情况。本研究在 Simulink 仿真计算中,将该程序以 s 函数的形式^[9]封装在圆筛机模块中。圆筛机的 Simulink 仿真模型如图 10 所示。

模型的核心模块是圆筛机模块,该模型还包括其他模块:茶叶流量、流量上限以及增加流量波动模块用于设置茶叶的入料量;组成比模块用于设置各尺寸茶

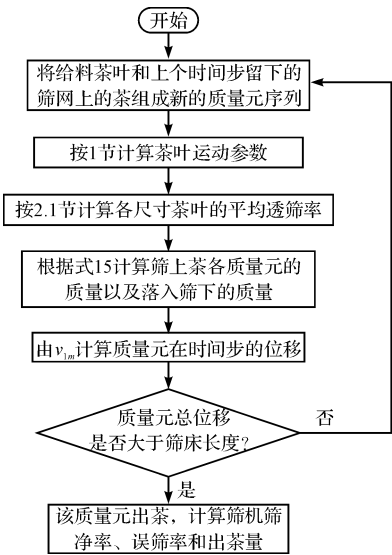


图 9 圆筛机程序计算流程

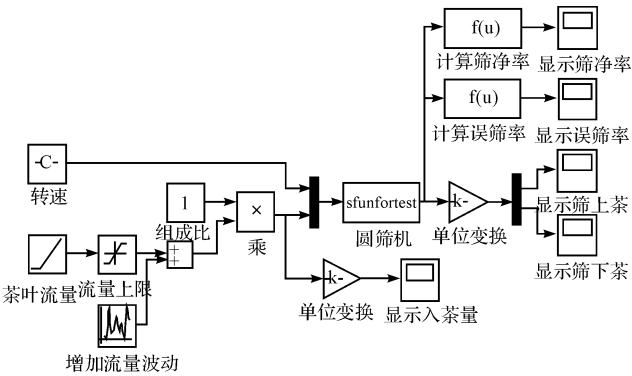


图 10 圆筛机的 Simulink 仿真模型

叶的组成比;转速模块用于设置圆筛机的转速。显示筛上茶和筛下茶模块分别用于显示筛上口和筛下口中各种尺寸茶叶的出茶量。本研究的人料量和出茶量均使用单位时间内的茶叶质量进行表征。

4 仿真结果及最佳转速的求解

4.1 仿真结果

本研究在模型中设置茶叶流量为斜坡输入,最终输入总流量为 800 kg/h,尺寸 3 mm~8 mm 的各茶叶比例为 0.15:0.17:0.19:0.20:0.16:0.13,筛机转速为 220 r/min,各茶叶输入量如图 11 所示。

本研究设置时间为 0~30 s,步长 5 e-3 s,采用 discrete 定步长求解器,运行圆筛机模型,结果如下:

筛上和筛下各尺寸茶叶的出茶速度分别如图 12、图 13 所示。当 $t < 23$ s 时,茶叶在圆筛机内运动,并没有到达出茶口。当 $t = 23$ s,圆筛机开始出茶。比较图 12 和图 13,可看出尺寸为 3 mm、4 mm、5 mm 的茶叶基本上透过了筛网,集中在筛下出茶;而尺寸为 7 mm、8 mm 的茶叶留在了筛网上,集中在筛上出茶。由于

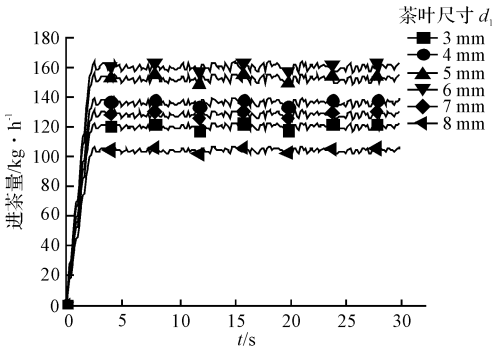


图 11 茶叶输入流量

6 mm 的茶叶尺寸与透筛临界尺寸较为接近,该尺寸茶叶在筛下和筛上均有分布,但大部分留在筛上。图 12、图 13 表明,本研究的 Simulink 模型能够模拟圆筛机区分大小尺寸茶叶的功能。

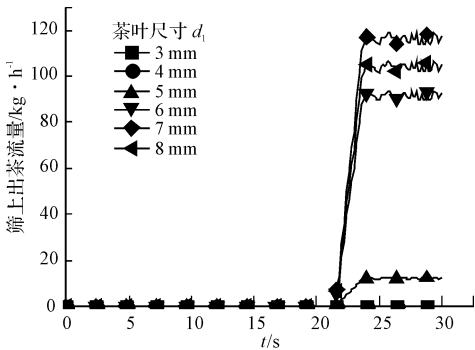


图 12 筛上出茶流量

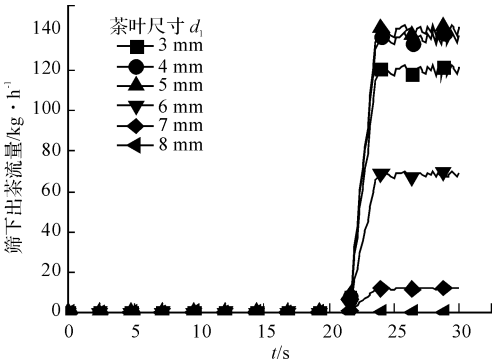


图 13 筛下出茶流量

圆筛机和抖筛机的筛分效果可以用筛净率和误筛率两个参数进行衡量^[10]。如果圆筛机能完全区分茶叶的大小,3 mm、4 mm、5 mm 的茶叶应在筛下出茶,定义这 3 种尺寸的茶叶为筛下茶;6 mm、7 mm、8 mm 的茶叶应在筛上出茶,定义这 3 种尺寸的茶叶为筛上茶。在实际生产过程中,尺寸较小的茶叶也有可能留在筛网上,尺寸较大的茶叶也可能透过筛网,落至筛下。

定义筛净率 η_1 为筛上出茶口出的茶叶中含筛上茶的质量百分数, $\eta_1 = m_1/m_a$ (式中: m_a —筛上出茶口中出的茶叶的质量, m_1 —其中含的筛上茶的质量)。

定义误筛率 η_2 为筛下出茶口出的茶叶中含筛上茶的质量百分数, $\eta_2 = m_2/m_b$ (式中: m_b —筛下出茶口中出的茶叶的质量, m_2 —其中含的筛上茶的质量)。

η_1 的值越大, η_2 的值越小, 筛分效果越好, 因此可以使用参数 $\eta = \eta_1 - \eta_2$ 来衡量圆筛机的筛分效果。本次仿真的筛净率 $\eta_1 = 95.8\%$, 误筛率 $\eta_2 = 20.7\%$, 筛分效率 $\eta = 75.1\%$, 可见筛分效果并不太好, 筛下出茶口混有较多尺寸为 6 mm 的茶叶。

4.2 最佳转速和进料范围

圆筛机的转速和茶叶的进料量对茶叶在筛网上的运动和各尺寸茶叶的透筛率均有影响, 进而影响筛机的筛分效率。本研究利用图 10 的圆筛机模型进行仿真, 得出了转速、进料量与 η 的关系。筛分效率和转速及进料量的关系如图 14 所示。

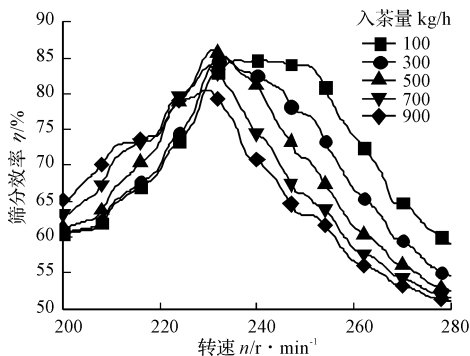


图 14 筛分效率和转速及进料量的关系

由图 14 可知, 筛分效率 η 随进料量和筛机转速变化而变化。每条曲线在转速为 230 r/min ~ 235 r/min 时达到最高点, 与 2.2 节的结论符合。当转速在该范围内时, 筛分效率随流量先增加后减小。当单位时间进茶量比较小时, 小尺寸的茶叶在进筛后的较短的时间内即可落下筛网, 只剩大尺寸的茶叶留在筛网上, 发生误筛的几率较大, 筛分效率 η 不大; 当单位时间进茶量比较大时, 茶叶未充分透筛即到达出茶口出茶, 筛分效率 η 也比较小。当进茶量为 300 kg/h ~ 600 kg/h 时, 转速为 230 r/min ~ 235 r/min 时, 茶叶的筛分效率 η 保持在 85% 以上。

5 结束语

本研究对茶叶在筛网上的运动轨迹和透筛情况进

行了分析, 建立了平面圆筛机的 Simulink 流量模型。在此基础上, 笔者分析了圆筛机的流量变化和转速变化对筛分效率的影响, 得出了筛机可有效工作的茶叶流量范围和最佳转速范围。

该流量模型能模拟平面圆筛机的茶叶输入输出情况, 是茶叶精制生产线流量模型的一个重要环节, 为日后生产线模型以及以保证流量平稳为指标的茶叶精制生产线流量控制系统的构建提供了基础, 同时该模型也能为现实生产活动提供一些可参考的理论依据。

参考文献 (References):

- [1] 金心怡. 茶叶加工工程 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2014.
- [2] LI J, WEBB C, PANDIELLA S S, et al. A numerical simulation of separation of crop seeds by screening effect of particle bed depth [J]. *Food and Bioprocess Processing*, 2002, 80(2): 109-117.
- [3] CLEARY P W, SINNOTT M D, MORRISON R D. Separation performance of double deck banana screen-Part 1: Flow and separation for different accelerations [J]. *Minerals Engineering*, 2009, 22(14): 1218-1244.
- [4] 赵章风, 张立彬, 汪晓华, 等. 茶叶圆筛条件分析与过程数值模拟 [J]. 茶叶科学, 2014, 34(1): 1-8.
- [5] 田良春. 平面回转筛理论探讨 [J]. 粮食与饲料工业, 1978, 1(4): 21-28.
- [6] 邓松如. 平面圆筛机工作原理分析 [J]. 四川农机, 1989(1): 13-16.
- [7] 汪晓华. 茶叶平面圆筛机筛分机理研究 [D]. 杭州: 浙江工业大学机械工程学院, 2012.
- [8] 焦红光, 金吉元, 王建军. 筛分数学模型的发展现状及分析 [J]. 金属矿山, 2006(2): 45-52.
- [9] 陈杰. Matlab 宝典 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
- [10] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. JB/T9811—2007. 茶叶平面圆筛机 [S]. 北京: 机械工业出版社, 2008.

[编辑: 李 辉]

本文引用格式:

朱贺嘉, 赵章风, 姜晓亮. 平面圆筛机的筛分过程研究和模型构建 [J]. 机电工程, 2015, 32(8): 1021-1026.

ZHU He-jia, ZHAO Zhang-feng, JIANG Xiao-liang. Screen process of plane-surface round sifter and construction of the simulation model [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2015, 32(8): 1021-1026.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>