

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.10.018

基于三平移并联机构的茶叶筛分试验*

谢俊¹ 张晓庆¹ 王成军²

(1. 江苏大学机械工程学院, 镇江 212003; 2. 安徽理工大学机械工程学院, 淮南 232001)

【摘要】 为解决传统茶叶筛分机械不能实现多维振动的问题, 基于并联机构组成原理, 选择了一种满足茶叶清选需要的全解耦三平移并联机构为茶叶筛分机的主体机构。应用 $D-H$ 矩阵计算出该并联机构运动学正、反解, 并且通过正交试验验证了其筛分性能。结果表明, 三自由度振动提高了茶叶在筛面上的分散度, 最短透筛时间为单自由度振动最短透筛时间的 $1/20$, 筛分性能较单自由度振动有大幅度提高。

关键词: 并联机构 茶叶筛分机 正交试验

中图分类号: TQ028.9⁺1; S226.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)10-0101-04

Tea Sieving Based on Three Translation Parallel Mechanism

Xie Jun¹ Zhang Xiaoqing¹ Wang Chengjun²

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

2. School of Mechanical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract

Based on the theory of parallel mechanism, a 3-DOF mechanism which was completely decoupled was chosen as the main part of the tea sieving machine to solve the problem that the traditional tea sieving machines can not complete multi-dimensional vibration. $D-H$ matrix was applied to calculate the forward and reverse solution of the position, and the orthogonal experiment was used to test the screening performance. The test shows that the 3-D vibration makes the tea spread fast in the screen surface, short the time by nearly 20 times and get a better screening performance.

Key words Parallel mechanism, Tea sieving machine, Orthogonal experiment

引言

茶叶筛分机械是精制茶叶生产过程中必不可少的设备, 目前广泛使用的茶叶筛分机械普遍采用曲柄摇杆机构, 使筛框产生单自由度平面运动。传统的单自由度茶叶抖筛机通过筛框的单自由度平面运动, 使得茶坯在筛床上作往复、跳跃和竖起运动, 达到粗细分离的目的。但是传统的茶叶筛分机械由于运动自由度少, 难以使茶叶在筛面上快速均布, 从而使得茶叶与筛面接触面积减小, 降低筛分效率。筛框作平面往复运动, 使得茶叶难以弹起, 从而容易出

现筛孔堵塞等问题。这些都使得传统茶叶筛分机械筛分效果较差和筛分效率偏低^[1]。

鉴于此, 本文提出一种基于三平移全解耦并联机构为主体的茶叶筛分机, 能实现筛框沿 X 、 Y 、 Z 3 个方向的平移, 使得筛框的运动为复杂的空间曲线, 取代传统筛分机械筛框的单自由度运动, 更加适用于茶叶的分级清选, 以解决传统茶叶筛分机械易于堵孔与筛分性能不稳定等缺陷^[2]。并且由于机构完全解耦, 所以振动幅度、频率和振动自由度都能独立调节且便于控制, 对不同品种的茶叶适应能力强。

收稿日期: 2011-11-18 修回日期: 2012-02-03

* 国家自然科学基金资助项目(50905077)、高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(2009327120007)、江苏省博士后基金资助项目(0901010B)和江苏大学高级人才启动基金资助项目(05JDG015)

作者简介: 谢俊, 副教授, 主要从事机械设计与自动化、智能材料与结构技术研究, E-mail: xiejun@ujs.edu.cn

1 机构描述与位置结构分析

1.1 机构结构描述

茶叶筛分机结构如图1所示,该机构由3条相同运动支链 $SOC\{-R_{i1} \parallel R_{i2} \parallel C_{i3}-\}$, $i=1,2,3$ 组成。转动副 $C1, C2, C3$ 分布在动平台1上,其轴线两两相互垂直。圆柱副 $A1, A2$ 分布在静平台2的两边上,其轴线相互垂直。 $A3$ 位于动平台2的立柱上,所以3个圆柱副的轴线也两两垂直,3条运动支链在空间中的关系也为两两垂直,可表示为 $(C \parallel R \parallel R) \perp (C \parallel R \parallel R) \perp (C \parallel R \parallel R)$ 。该机构的输入-输出具有完全解耦性,有利于运动控制^[3]。

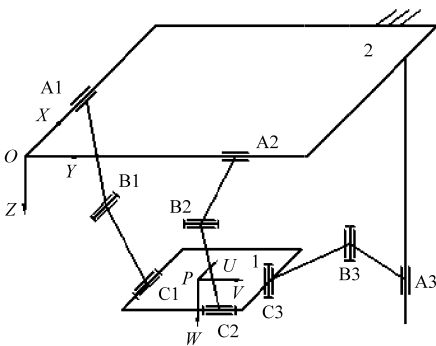


图1 茶叶筛分机结构示意图

Fig.1 Structural diagram of tea sieving machine

1.2 位置正反解

已知选取图中的3个圆柱副 $A1, A2$ 与 $A3$ 中的移动副为驱动副(因为圆柱副可以用与中心线相平行的一个移动副和一个转动副来代替)^[4]。取坐标系 $OXYZ$ 固定于静平台,同时在动平台上建立坐标系 $PUVW$,坐标原点为 P 。设坐标原点 P 在固定坐标系 $OXYZ$ 的坐标为 (x_p, y_p, z_p) , $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ 为动平台坐标系 $OXYZ$ 相对于静坐标系的 $PUVW$ 3个独立转角。所以动坐标系 $PUVW$ 中任何一个向量 r 可以通过 $D-H$ 矩阵进行坐标变换到固定坐标系 $OXYZ$ 的 R 。

$$R = Dr \quad (1)$$

$$D = \begin{bmatrix} c\theta_x c\theta_y & c\theta_2 s\theta_y s\theta_x - s\theta_2 c\theta_x & c\theta_2 s\theta_y c\theta_x + s\theta_2 s\theta_x & x_p \\ s\theta_2 s\theta_y & s\theta_2 s\theta_y s\theta_x + c\theta_2 c\theta_x & s\theta_2 s\theta_y s\theta_x - c\theta_2 c\theta_x & y_p \\ -s\theta_y & c\theta_y s\theta_x & c\theta_y c\theta_x & z_p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式(1)中, D 为 $D-H$ 矩阵,由于本文涉及的 $(C \parallel R \parallel R) \perp (C \parallel R \parallel R) \perp (C \parallel R \parallel R)$ 并联机构只能实现3个坐标轴方向的平动,则使得 $\theta_x = \theta_y = \theta_z = 0$,所以将其代入式(2),得

$$D = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_p \\ 0 & 1 & 0 & y_p \\ 0 & 0 & 1 & z_p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_p \\ 0 & 1 & 0 & y_p \\ 0 & 0 & 1 & z_p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} r \quad (4)$$

当并联机构的结构参数和动平台参考点 P 在固定坐标系中的位置坐标 (x_p, y_p, z_p) 确定以后,若动平台上的 $C1, C2, C3$ 在动坐标系 $PUVW$ 中坐标分别为 (u_{C1}, v_{C1}, w_{C1}) 、 (u_{C2}, v_{C2}, w_{C2}) 、 (u_{C3}, v_{C3}, w_{C3}) ,可以由式(4)求得机构位置反解为

$$\begin{cases} x_{A1} = u_{C1} + x_p \\ y_{A2} = v_{C2} + y_p \\ z_{A3} = w_{C3} + z_p \end{cases} \quad (5)$$

当并联机构的主动件输入 (x_{A1}, y_{A2}, z_{A3}) 确定以后,由上式确定并联机构的位置正解为

$$\begin{cases} x_p = x_{A1} - u_{C1} \\ y_p = x_{A2} - u_{C2} \\ z_p = x_{A3} - u_{C3} \end{cases} \quad (6)$$

1.3 解耦性分析

由正反解的结论可知,输出变量和输入变量的函数表示为

$$\begin{cases} f(x_p) = f(x_{A1}) \\ f(y_p) = f(x_{A2}) \\ f(z_p) = f(x_{A3}) \end{cases} \quad (7)$$

由式(7)的正、反解可以得出,该三平移并联机构实现了三维输入完全解耦,使得控制变得相对容易,满足茶叶筛分机清选的需要^[4]。

2 茶叶筛分试验方案

2.1 正交试验方案设计

筛分作业包括粒状物料的分散(由 Y 方向决定)、分层(由 Z 方向决定)和细粒物料的透筛等过程。物料的分层常包含在分散和透筛过程中,因而分散度和透筛性能是筛分机的两个重要性能指标,常用透筛时间来表征^[5]。茶叶透筛时间也表征茶叶筛分机械的工作效率,透筛时间越短,筛分效率越高。

采用正交试验方案,验证三平移振动筛缩短透筛时间的效果。试验因素为筛分机运动自由度、振动频率、振幅、茶叶含水率和茶叶掺杂率,评价指标为透筛时间,因素水平如表1所示^[6-7]。

表 1 正交试验因素水平

Tab. 1 Factor and levels of orthogonal experiment

水平	含水率 $a/\%$	振幅 b/mm	频率 c/Hz	自由度 d	掺杂率 $e/\%$
1	0	8	2.0	X	0
2	15	11	2.2	XY	10
3	20	13	3.0	XZ	20
4	30	14	5.0	XYZ	29

2.2 正交试验结果分析

根据正交表 $L_{16}(4^5)$ 进行试验,得到如表 2 所示的试验数据^[8]。

表 2 正交试验方案和结果

Tab. 2 Plan and results of orthogonal experiment

序号	A	B	C	D	E	透筛时间/s
1	1	1	1	1	1	900
2	1	2	2	2	2	60
3	1	3	3	3	3	36
4	1	4	4	4	4	14
5	2	2	2	2	3	47
6	2	2	1	3	4	59
7	2	3	4	1	2	46
8	2	4	3	2	1	44
9	3	1	3	1	2	1 500
10	3	2	4	3	1	20
11	3	3	1	2	4	44
12	3	4	2	1	3	35
13	4	1	4	2	3	56
14	4	2	3	1	4	600
15	4	3	2	4	1	48
16	4	4	1	3	2	40
K_1	1 010	2 400	1 043	3 137	1 012	
K_2	196	842	190	195	1 646	
K_3	1 599	174	2 236	155	186	
K_4	744	133	80	62	773	
R	350.75	566.75	539	768.75	382	

在本试验中,由于 $R_D > R_B > R_C > R_E > R_A$,所以各因素的主次顺序为:自由度、振幅、频率、掺杂率和含水率。

各因素对透筛时间影响趋势如图 2 所示。由图可知:自由度对筛分性能的影响为: X 单方向往复振动下的茶叶透筛时间很长;增加 Y 方向的振动后,由于 Y 方向的振动使得茶叶在筛面的径向(筛面平面内垂直于入料端筛边的中点连线的方向)产生运动,物料在筛面上快速分布,增加了茶叶与筛面的接

触面积,从而缩短了筛分时间,说明 Y 方向振动对茶叶在筛面的分散与透筛性能的提高有相当重要的影响; X 、 Y 、 Z 3 个方向的振动对筛分性能的提高明显优于 2 个方向的振动。因为 Z 方向的振动使得茶叶在筛网上呈抛动方式进行运动,实现了茶叶物料分层的目的,从而缩短了透筛时间。

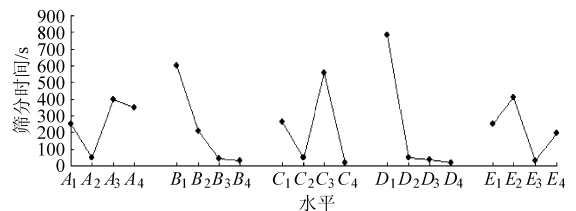


图 2 各因素对透筛时间影响趋势

Fig. 2 Tendency of effect of each factor on leaking screen time

2.3 最优方案的确定

试验指标为透筛时间,透筛时间越短表征筛分效率越高,应该选取 K 最小的水平为最优方案。所以,最优方案为 $A_2B_4C_4D_4E_3$,即含水率 15%、振幅 14 mm、频率 5.0 Hz、自由度为 XYZ 和掺杂率为 20%。

3 茶叶筛分试验结果与分析

3.1 试验装置及试验条件

试验在自行研制四自由度多维振动筛分试验台上进行,如图 3 所示^[9]。该筛分试验台主要由机架、旋转平台、三平移并联机构(3P-R || R || R)、筛框、控制箱和直线电动机等组成。通过多维振动试验台本身的三平移并联机构和串联的曲柄摇杆驱动旋转平台可以实现筛框在 X 、 Y 、 Z 3 个方向上的平移及绕 Z 轴的转动,本文只取其 X 、 Y 、 Z 3 个方向的平移进行试验。其中振动频率、振幅都可以通过控制箱进行调节,这些参数都由光栅传感器实时测得,并且可以记录到计算机中^[10]。

试验选取等质量黄山毛峰茶叶(200 g),该茶叶

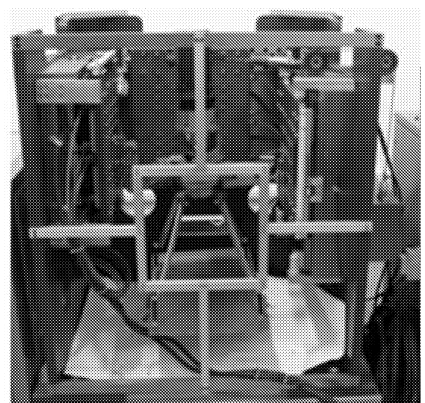


图 3 四自由度振动筛分试验台

Fig. 3 4-DOF librating screening test bench

形状为长条形,并且掺杂率较低。根据茶叶抖筛机试验方法标准,选择7目圆孔筛网进行试验。设定筛分机的振幅为14 mm,振动频率为5 Hz,测试其在 X 、 XY 、 YZ 和 XYZ 4种多自由度振动条件下的透筛时间。

3.2 试验结果分析

试验结果如表3所示, XYZ 三自由度振动条件下,茶叶在筛面上能快速均布,茶叶的透筛时间最短,是单自由度振动最短透筛时间的1/20。所以筛

表3 多维振动透筛时间对比

Tab.3 Comparison of leaking screen time under multi-dimensional vibration

自由度	X	XY	YZ	XYZ
透筛时间/s	800	85	70	40

分性能最优,与图2正交试验分析结论一致。

4 结论

(1)针对传统茶叶筛分设备不能实现多维振动的不足,提出了三平移并联机构茶叶筛分机。

(2)对三平移并联机构的进行了运动学分析,求得该三平移机构的位置正反解,表明三平移机构的输入、输出具有完全解耦性,运动控制相对容易。

(3)运用正交试验,分析了三维振动茶叶筛分机各主要工作参数对筛分效果的影响,验证了增加 Y 向与 Z 向振动对筛分效率的提高有比较重要的作用。

(4)通过试验验证了正交试验对自由度的结论三自由度振动最短透筛时间是单自由度振动最短透筛时间的1/20,透筛性能达到最优。

参 考 文 献

- 沈惠平,张会芳,何宝祥,等.一种新型并联运动振动筛及其运动学研究及研制[J].机械设计,2007,24(6):34~36.
Shen Huiping, Zhang Huifang, He Baoxiang, et al. A kind of novel parallel movement vibration sieve and its kinematic research and development [J]. Journal of Machine Design, 2007,24(6):34~36. (in Chinese)
- 张会芳,沈惠平,杨廷力,等.一种新型并联运动振动筛主机及其运动学分析[J].江苏工业学院学报,2007,19(2):38~41.
Zhang Huifang, Shen Huiping, Yang Tingli, et al. A novel main mechanism of parallel kinematic sieve and kinematics [J]. Journal of Jiangsu Polytechnic University, 2007,19(2):38~41. (in Chinese)
- 杨廷力.机械系统基本理论——结构学、运动学、动力学[M].北京:机械工业出版社,1996.
- 谢俊,尹小琴,马履中,等.基于多轴运动控制器的三自由度并联秧苗移栽机器人的研究[J].机械科学与技术,2011,30(2):336~339.
Xie Jun, Yin Xiaoqin, Ma Lüzhong, et al. A three-DOF parallel robot for transplanting rice seedlings based on multi-axis motion controllers [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2011, 30(2):336~339. (in Chinese)
- 焦红光.振动筛分过程解析[M].北京:煤炭工业出版社,2008.
- 施卫东,孙新庆,陆伟刚,等.矿用潜水电泵性能正交试验[J].排灌机械工程学报,2011,29(1):7~10.
Shi Weidong, Sun Xinqing, Lu Weigang, et al. Orthogonal experiment on performance of submersible mining pump [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011,29(1):7~10. (in Chinese)
- 杨晓彬,李耀明,徐立章,等.颗粒物料在三维振动筛中透筛信息仿真[J].农机化研究,2010,28(2):140~142.
Yang Xiaobin, Li Yaoming, Xu Lizhang, et al. The simulation for screening information of the material in the three-dimension vibratory screen [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010,28(2):140~142. (in Chinese)
- 李云雁,胡传荣.试验设计与数据处理[M].北京:化学工业出版社,2008.
- 王成军,李耀明,马履中,等.三自由度混联振动筛设计[J].农业机械学报,2011,42(11):53~56.
Wang Chengjun, Li Yaoming, Ma Lüzhong, et al. Design of three degree of freedom hybrid vibration screen [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(11):53~56. (in Chinese)
- 王成军,李耀明,马履中.基于并联机构的多维振动筛分试验台设计[J].农业机械学报,2012,43(4):70~74,112.
Wang Chengjun, Li Yaoming, Ma Lüzhong. Design of multi-dimensional vibration screening test bench based on parallel mechanism [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(4):70~74,112. (in Chinese)