

基于三维投影矩阵的生产流水线 对接系统平台构建

Construction of production line docking system platform based on three-dimensional projection matrix

张娟娟¹沈小渝²ZHANG Juan-juan¹ SHEN Xiao-yu²

(1. 四川财经职业学院, 四川 成都 610101; 2. 电子科技大学成都学院, 四川 成都 611731)

(1. *Sichuan Finance and Economics Vocational College, Chengdu, Sichuan 610101, China*; 2. *Chengdu College of University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China*)

摘要:针对工作台扭摆会导致机械加工对接产生误差,提出基于三维投影矩阵构建生产流水线对接系统平台,以降低对接误差。三维运动平台采用脉冲信号控制的步进电机进行驱动,达到机床限位控制;通过控制激光器开关和控制激光器的输出功率实现系统的激光控制;通过多普勒频差测量位移技术,采用交流前置放大器替换常规直流放大器等,获取精准实时测量数据;根据三维立体视觉校对原理提取对接区域图像特征点,依据特征点校验机械加工平台三维对接图像时,采用 Powell 方法求解三维阶段投影矩阵对接目标函数最小值,实现机械加工的高精度对接。结果表明:机械加工对接的最大相对误差为 1.50%,精准确度高,进行机械加工耗时 18~23 min,花费时间较短。

关键词: 三维投影矩阵;激光控制器;对接;特征点

Abstract: Due to the problems of torsion and swing of worktable in food machinery processing enterprises, errors happen to the docking in the mechanical processing. Therefore, a platform for the production line docking system, based on three-dimensional projection matrix, was designed to proposed to reduce docking error. Firstly, the three-dimensional motion platform of the system adopted a stepping motor controlled by pulse signal to achieve the limit control of machine tool. Secondly, the laser control of the system was realized by controlling the laser switch and the output power of the laser. Thirdly, the displacement measurement technology of Doppler frequency difference was adopted, and the AC front-end was also applied. The amplifier replaced the conven-

tional DC amplifier to obtain accurate real-time measurement data. Finally, the feature points of the docking area image were extracted by the system software, according to the principle of three-dimensional stereo vision proofreading. When checking the three-dimensional docking image of the machining platform based on the feature points, the minimum value of the docking objective function of the three-dimensional phase projection matrix was solved by Powell method, which realized the high precision docking of the mechanical processing. The results showed that the maximum relative error of mechanical docking was 1.50%, with a high accuracy and a quick performance, and only 18~23 minutes was needed.

Keywords: three-dimensional projection matrix; laser controller; docking; characteristic points

在实践中,规模化发展的食品工业需要更多更长的加工流水线,这些流水线不可避免地存在平台对接问题。而机械加工对接过程中受工作台扭摆易产生误差^[1],致使监控对接过程的信号传感器受到影响,大大降低了机械加工对接的精确度,导致机械加工控制效果差^[2]。杨亮亮等^[3]提出了将迭代学习控制方法从时域辨识拓展到正交矢量基函数空间领域,提高了控制系统的位置跟踪精度和响应性能,但对控制系统控制参数的把握较复杂且准确度不高。朱庄生等^[4]提出了单目视觉检校方法,分析了合作靶标精度对单目视觉姿态测量精度的影响,利用合作靶标实现了视觉高精度姿态测量;基于正交矢量和动态滤波的联合标定法等实现了具备高精度姿态精度的单目视觉检校系统,但耗时较长,不利于实际应用。

基于上述问题,试验拟设计基于三维投影矩阵构建生产流水线对接系统平台,在机械加工对接过程中按照三维立体视觉原理,提取对接图像特征点,针对特征点进

基金项目: 四川省教育厅项目(编号:16ZB0395)

作者简介: 张娟娟,女,四川财经职业学院讲师,硕士。

通信作者: 沈小渝(1980—),男,电子科技大学副教授,博士。

E-mail: xyshenxy@163.com

收稿日期: 2019-05-09

行三维投影矩阵计算,通过投影矩阵校对提高机械加工对接的精确度,改善机械加工控制效果。

1 系统结构设计

机械加工工作台由于自身扭摆易产生误差^[5],而三维投影矩阵在机械加工对接研究中效果显著^[6],因此设计基于三维投影矩阵的机械加工系统平台,将三轴测量与三维控制规划到控制系统中,得到机械加工控制系统结构框图如图 1 所示。图 1 中,系统对 X、Y1、Y2 展开控制,抑制由于工作台摆动产生的误差。使用精密工件台、微动台的组合结构作为机械结构,采用微动台进行精准定位,使定位系统取得高精度定位度与点动灵敏度^[7],且控制更为便捷。

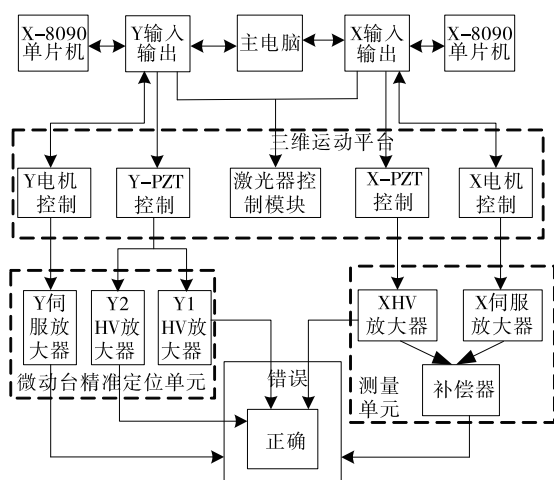


图 1 食品生产流水线对接系统平台结构框图

Figure 1 Structure block diagram of docking system platform for food production line

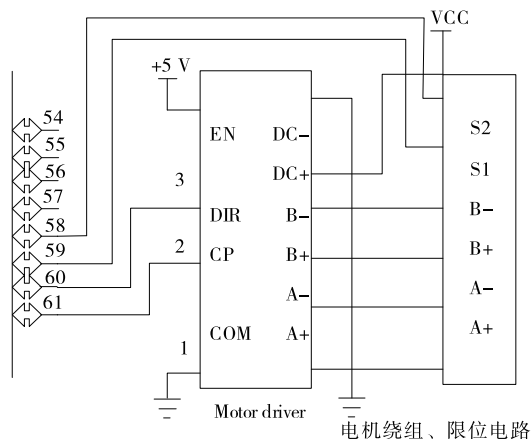
由图 1 可知,系统由两个 8098 单片机电路、激光器控制模块、测量单元、微动台精准定位单元及三维运动平台等组成。机械加工控制系统的工作台精密工作特性要求 X-Y 工件台实现高速精准定位,且满足两个方向在同一时间进行实时定位等特点^[8]。因此,在 X、Y 两个方向上各加一片 8098 单片机实现两个方向的单独控制,并使 X、Y 两个方向可以在同一时间运动。由于 X、Y 能够独立控制,所以 X、Y 运动互不影响,使得工件台在工作过程中一直处于实时有效的闭环控制下,确保工件台工作效率高,且具备较高控制实时性^[9]。两个方向的单片机工作相对独立,可以实现两个方向的软件、硬件基本相互兼容。系统的突出优点是调试方法简单,工作稳定,且后期维护便捷性强。

2 系统硬件设计

2.1 三维运动平台

机械加工控制系统中的三维运动平台采用一种对脉冲信号控制的步进电机进行驱动。步进电机通过调整脉

冲频率来调整电动机转数,三维运动平台需要 3 个步进电机进行 3 个维度的独立驱动,驱动方式相同,图 2 为其中一维的运动控制模块电路图。由图 2 可知,电机驱动器的 DIR 口和 CP 口分别与步进电机独立驱动的两个 I/O 端口相连,控制电机转动方向与脉冲。驱动器 A、B 各自连接对应的电机绕组,S1、S2 为限位电路接口引脚,能各自连接单片机的 I/O 端口,达到机床限位控制的目的。



1. 电机绕组 2. 独立驱动 3. 独立驱动 A. 步进电机驱动器 B. 步进电机驱动器 S1、S2. 限位电路接口引脚

图 2 三维运动平台控制模块电路图

Figure 2 Circuit diagram of control module for 3D motion platform

2.2 激光器控制模块设计

激光器控制模块是三维运动平台的组成部分,该模块通过控制激光器开关和控制激光器的输出功率实现系统的激光控制,获取机械对接的三维投影^[10]。新研发的激光电源在前期激光电源设备的基础上进行了改进,合并两个输入端口为一个脉冲输入接口,调节激光器的开关和输出功率。采用 ATmega128 的两个 I/O 端口对激光器进行控制。激光器控制模块中 PG0 控制激光器开关,通过调节输出高、低电平实现激光器开关控制。激光器控制模块的 PG1 通过改变输出频率脉冲实现激光器功率的控制。

2.3 测量单元

机械加工控制系统的性能指标一定程度上由测量系统的精准度决定^[11]。测量单元是机械加工控制系统的重要组成部分,要求测量单元需具备测量精准度高、反应灵敏度高、稳定性强等优点。测量单元通过多普勒频差测量位移技术,采用交流前置放大器替换常规直流放大器,实现高精度动态测量,获取精准实时测量数据,根据配备的自动补偿器补偿波长变化。

2.4 微动台精准定位单元

微动台精准定位单元依据系统测量单元的测量值,

采用三维投影矩阵对接校对算法进行精准定位。图3为微动台精准定位电路原理图。微位移性能指标包括:量程 $145\ \mu\text{m}$;频响范围 $0\sim 4\ \text{kHz}$;推力 $3\ 000\ \text{N}$;拉力 $600\ \text{N}$;刚度 $16\ \text{N}\cdot\mu\text{m}$;位移分辨率 $>0.01\ \mu\text{m}$ 。图3中,驱动器放大器为一个线性放大器,具备分辨率高与稳定性强的特点,电压输出为 $0\sim 1\ 200\ \text{V}$ 。

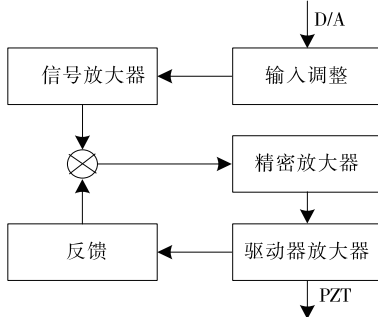


图3 微动台精准定位电路原理图

Figure 3 Principle diagram of precise positioning circuit for micro-motion stage

3 系统软件设计

3.1 基于立体视觉校对的对接图像特征点提取

机械加工控制系统平台的加工对象对接是实现精准加工的关键^[12-13],系统基于立体视觉校对提取对接图像的特征点。依照图像识别原理选择两个性能较优的对接装置实施对接,按照三维立体视觉原理提取对象图像特征点后,依据该特征点对机械加工平台的三维对接图像进行校验^[14],提取图像特征点过程如下。

机械加工校验对接时,选取应符合相似度要求的对接图像,从该图像中采集对接区域的特征点,针对对接区域实施有效的三维区域定位,样本图像采集原理如图4所示。

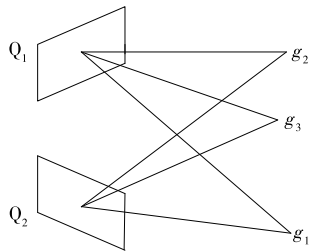


图4 样本图像采集原理

Figure 4 Principle of sample image collection

由图4可知,机械加工对接图像像素点用 g 表示,通过图像采集设备 Q_1 采集机械对接平台图像对接点 g_1 , Q_1 、 Q_2 两个图像采集设备需同时采集对接平台其他对接点图像, G 为与此图像相应的实际对接平台特征点,根据特征点空间位置关系,完成机械加工对接的三维图像空

间特征点定位。

在设备对接过程的样本图像中随机选择一点 G , G 在图像采集设备 Q_1 、 Q_2 上的特征点分别为 g_1 、 g_2 , 其对应的投影矩阵分别为 h_1 、 h_2 , 得式(1)、(2)。

$$B_{r1} \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \theta_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11}^1 & h_{12}^1 & h_{13}^1 & h_{14}^1 \\ h_{21}^1 & h_{22}^1 & h_{23}^1 & h_{24}^1 \\ h_{31}^1 & h_{32}^1 & h_{33}^1 & h_{34}^1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z \\ A \\ B \\ I \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$B_{r2} \begin{bmatrix} \phi_2 \\ \theta_2 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11}^2 & h_{12}^2 & h_{13}^2 & h_{14}^2 \\ h_{21}^2 & h_{22}^2 & h_{23}^2 & h_{24}^2 \\ h_{31}^2 & h_{32}^2 & h_{33}^2 & h_{34}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z \\ A \\ B \\ I \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中:

$(\phi_1, \theta_1, 1)$ 、 $(\phi_2, \theta_2, 1)$ —— 图像采集设备采集的对接三维图像特征点坐标;

(Z, A, B, I) —— 标准坐标系中上述特征点的坐标。

各特征点的变换处理通过式(3)实现。

$$B_{e1}\phi_1 = h_{11}^1 Z + h_{12}^1 A + h_{13}^1 B + h_{14}^1 I. \quad (3)$$

按上述方法提取对接图像特征点,完成机械加工控制对接。

3.2 三维投影矩阵对接校对算法设计

3.2.1 三维投影矩阵的定义及计算 依据提取的特征点对机械加工平台的三维对接图像进行校验,根据3.1中提取的特征点构建几何矩阵,如式(4)。

$$\Delta nmi = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} a^n b^m c^i f(a, b, c) d_a d_b d_c. \quad (4)$$

将式(4)视为机械加工设备对接图像特征,展开几何矩阵计算。由于计算量庞大,无法应用到图像校对中,故将式(4)进行转变:

$$\Delta nmi = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} a^n b^m c^i \left[\int_{-\infty}^{+\infty} f(a, b, c) c^i d_c \right] d_a d_b, \quad (5)$$

式中:

$\left[\int_{-\infty}^{+\infty} f(a, b, c) c^i d_c \right]$ —— 几何阵中 z 轴的子距,形式变换为:

$$T_i(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(a, b, c) c^i d_c. \quad (6)$$

在 $i \in \{0, 1, \dots\}$ 上取得 $T_i(a, b)$, 即任意一个阶矩,完成机械加工对接信息 $f(a, b, c)$ 的还原。

依照投影定义式(6)可知,在 $c = 0$ 平面上, $(\hat{a}, \hat{b})$ 在 i 阶段投影矩阵表示为式(7)。

$$T_i(\hat{a}, \hat{b}) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(\hat{a}, \hat{b}, c) c^i d_c, \quad (7)$$

直线 $a = \hat{a}$ 垂直于 $c = 0$, 通过 $b = \hat{b}$ 计算机械加工对接平台的第 n 个三角贴面交点,取得交点 c 的 $c_n = \hat{c}_n$, 设定 $\sigma_a^n, \sigma_b^n, \sigma_c^n$ 为三角贴面的法向量,采用二值化取得三维

投影矩阵如式(8)所示。

$$T_i(\hat{a}, \hat{b}) = \sum_n \left(\frac{1}{i+1} \hat{c}_n^{i+1} \left| \frac{\sigma_c^n}{\sigma_c^n} \right| \right). \quad (8)$$

3.2.2 投影矩阵校对试验 设定机械 1、2 两种食品加工机械设备。针对机械 1 实施任意阶矩阵的投影,基于式(8),机械 1 的投影矩阵用 $T_i^1(\hat{a}, \hat{b}), i = 0, 1, \dots, M$ 表示, M 为待求矩阵最高阶数。针对机械 2 实施初始映射转换,转换完成后用 $T_i^2(\hat{a}, \hat{b}), i = 0, 1, \dots, M$ 计算机械 2 对应的阶矩阵投影矩阵,校对机械平台中不同机械投影矩阵,实现机械加工对接^[15],校对采用的目标函数如式(9)所示。

$$\min f(X) = \sum_{i=0}^M [T_i^1(\hat{a}, \hat{b}) - T_i^2(\hat{a}, \hat{b})]^2, \quad (9)$$

式中:

$\min f(X)$ —— 目标函数最小值。

$X = \Delta a, \Delta b, \Delta z_c, S_a, S_b, S_c, \theta_a, \theta_b, \theta_c$ —— 待优化

参数,表示 a, b 与 c 方向上对接机械的位置移动、收缩放大与旋转角度。

最后采用 Powell 方法求解目标函数的最小值,得到精准的对接校对结果,从而改善机械加工平台对接效果。

4 试验分析

4.1 系统控制效果分析

为验证试验设计的基于三维投影矩阵的机械加工系统的有效性,进行如下试验分析。

试验以机械 1、2 为测试对象,给出 a, b, c 方向中两个加工设备的映射变换关系的位置移动、收缩放大与旋转角度的实际数据,采用试验设计系统、正交投影控制系统、单目视觉控制系统对两个食品机械加工设备进行控制,测试 3 种系统下机械 1、2 位置移动、收缩放大与旋转角度数据,与实际结果进行对比,结果如表 1 所示。

表 1 3 种系统测试结果方差分析

Table 1 Comparison of test results for 3 systems

机械	试验设计系统			正交投影控制系统			单目视觉控制系统		
	位置移动	收缩放大	旋转角度	位置移动	收缩放大	旋转角度	位置移动	收缩放大	旋转角度
1	1.334	0.588	0.061	1.942	0.998	0.175	2.458	1.346	0.358
2	0.697	0.801	0.304	1.234	1.125	0.598	1.850	1.585	0.965

由表 1 可知,试验设计系统控制的机械 1、2 的位置移动、收缩放大、旋转角度的精度方差均小于正交投影控制系统和单目视觉控制系统,表明试验设计系统具备高精度的控制效果,满足食品机械加工对接的需求。

4.2 系统控制效率与精度分析

由图 5 可知,试验设计系统进行机械加工耗时 18~23 min,正交投影控制系统加工耗时 35~40 min,单目视觉控制系统加工耗时 25~31 min,与同类型系统相比,试验设计系统节省了大量的加工时间,能够实现机械加工系统的高效运行。

由图 6 可知,试验设计系统的精确度最大可以无限接近于 100%,最小精确度也在 95% 左右,表明试验设计

系统控制精确度高于其他两种系统,能够确保机械加工的高精确度运行。

4.3 不同条件下系统控制误差分析

为验证试验设计系统控制机械加工对接的普适性,以 5 cm×5 cm、10 cm×10 cm 尺寸的食品为对象,采用 3 种系统进行食品加工对接试验,结果见表 2、3。

由表 2、3 可知,加工不同尺寸食品时,试验设计系统进行机械加工对接的相对误差和对接时间均小于正交投影控制系统和单目视觉控制系统。针对 5 cm×5 cm、10 cm×10 cm 尺寸的食品进行对接,试验设计系统最大相对误差值分别为 1.50%,1.11%,单目视觉控制系统最大相对误差值分别为 3.85%,2.45%,正交投影控制系统

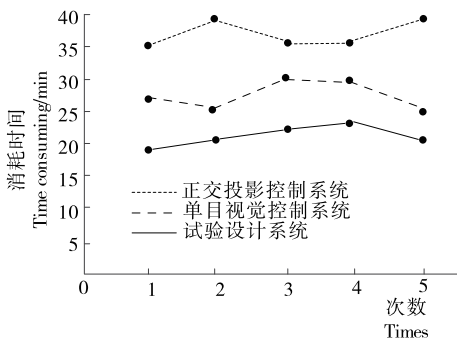


图 5 3 种系统耗时对比

Figure 5 Time-consuming comparison of three systems

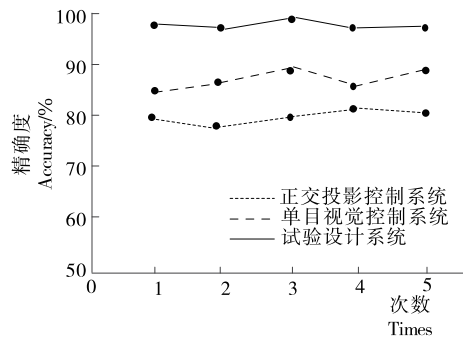


图 6 3 种系统精确度对比

Figure 6 Accuracy comparison of three systems

表 2 5 cm×5 cm 尺寸食品测试结果对比
Table 2 Comparisons of food test result of 5 cm×5 cm dimension

试验号	试验设计系统		单目视觉控制系统		正交投影控制系统	
	相对误差/%	对接时间/s	相对误差/%	对接时间/s	相对误差/%	对接时间/s
1	1.23	4.23	2.59	7.56	3.21	9.23
2	0.98	5.21	3.04	8.02	3.56	9.45
3	1.11	4.21	3.25	7.06	3.45	9.25
4	0.85	5.33	3.85	8.22	4.02	10.02
5	1.35	5.18	3.56	8.41	4.99	9.88
6	0.79	5.09	3.71	7.98	3.95	9.75
7	1.50	4.81	2.99	7.82	3.71	10.05
8	1.33	4.55	3.31	7.69	3.83	10.68
9	0.99	5.35	2.95	8.04	4.15	9.82
10	0.71	4.85	3.01	8.33	4.03	9.56
平均值	1.084	4.881	3.226	7.913	3.89	9.769

表 3 10 cm×10 cm 尺寸食品测试结果对比
Table 3 Comparisons of food testing result in the dimension of 10 cm×10 cm

试验号	试验设计系统		单目视觉控制系统		正交投影控制系统	
	相对误差/%	对接时间/s	相对误差/%	对接时间/s	相对误差/%	对接时间/s
1	1.01	2.12	2.01	5.24	2.23	7.35
2	0.65	3.89	1.95	2.17	2.01	7.28
3	1.00	2.10	1.45	6.24	3.52	7.99
4	0.62	3.23	1.23	6.08	3.65	7.09
5	1.11	3.07	2.32	5.62	2.56	7.71
6	0.52	3.05	2.45	6.17	2.71	6.98
7	1.02	2.72	2.12	5.44	2.56	7.55
8	1.03	3.44	2.36	6.02	2.75	6.88
9	0.56	2.51	2.01	5.51	3.21	7.62
10	0.45	2.74	1.85	5.87	3.65	7.98
平均值	0.797	2.887	1.975	5.436	2.885	7.443

最大相对误差值分别为 4.99%,3.65%,试验设计系统的对接精准度较高;同时,对接时间显示,试验设计系统所需对接时间短、波动性小,能够稳定实现机械加工的对接。

5 结论

试验设计系统采用微动台实现了系统的精准定位,依据系统测量单元的测量值、采用三维投影矩阵对接校对算法进行精准定位,提升了机械加工控制系统的控制精确度。为进一步改善机械加工的控制效果,可引入三维投影矩阵进行精准对接。

参考文献

[1] 丁延松,陈玲萍.虚拟现实技术在食品工厂机械与设备教学中的应用[J].食品与机械,2017,33(10):104-106.
[2] 冯春成,刘满禄,张华,等.工业机器人机械臂加工目标定位控制研究[J].计算机仿真,2017,34(6):319-324.

[3] 杨亮亮,史伟民,刘宜胜,等.直线伺服系统正交投影迭代学习控制器参数辨识与优化[J].中国机械工程,2015,26(1):79-85.
[4] 朱庄生,袁学忠.基于单目视觉的位置姿态测量系统精度校验方法[J].中国惯性技术学报,2018,26(5):100-105,110.
[5] LEE S H, CHOI W, JUN S. Conventional and emerging combination technologies for food processing[J]. Food Engineering Reviews, 2016, 8(4): 1-21.
[6] 付雯,李响.基于三维图像校对的食品机械加工对接平台设计[J].食品与机械,2015,31(5):153-156.
[7] 刘战强,贺蒙,赵建.机械加工强化机理与工艺技术研究进展[J].中国机械工程,2015,26(3):403-413.
[8] 刘永春,龚华军,耿征,等.基于全息定向散射屏的光场三维成像系统研究[J].激光与光电子学进展,2015,52(10):163-171.

(下转第 74 页)

表 2 混合搅拌介质物料的分布指数
Table 2 Distribution index of mixed media

物料	产量吸收指数	消耗指数	生产效率指数
氮	6	1.5	190
磷	2	0.5	510
钾	10	2.5	98

表 3 微波反应釜的物料搅拌平衡指标

Table 3 Nutrient balance, balance index and balance rate index of material agitation in microwave reactor

物料	养分平衡/(kg·mol ⁻¹)	平衡指数	平衡率/%
氮	14.6	4.0	134.6
磷	4.5	6.4	-5.6
钾	134.6	65.7	-41.8

分析物料混合的养分吸收量与搅拌控制的关系,得到微波反应釜的物料双层搅拌吸收增量分布如图 5 所示。由图 5 可知,采用试验方法进行双层搅拌结构微波反应釜的物料混合控制均匀性较好,物料混合均匀控制双层搅拌稳定性较好。

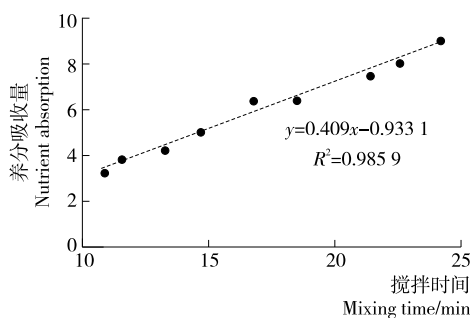


图 5 微波反应釜的物料双层搅拌吸收增量分布

Figure 5 The increment distribution of material double-layer agitation absorption in microwave reactor

5 结论

试验研究了相关因素下双层搅拌结构微波反应釜的物料混合均匀性控制方法,分析了控制约束模型、控制算法和双层搅拌结构微波反应釜的物料混合均匀性分析的试验材料、仪器和测试方法。结果表明,采用玻璃珠和氧化铝珠作为物料混合的搅拌介质,进行双层搅拌的误差反馈调节和自适应控制,可实现双层搅拌结构微波反应釜的物料混合均匀性能,提高物料混合均匀性。后续可研究适当增加双层搅拌结构微波反应釜的混合搅拌时间与混合搅拌次数,从而提升试验结果的准确性。

参考文献

[1] 杨闪闪, 王玲, 廖启豪, 等. 基于径向基函数法的五轴数控机床空间动态性能研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(9): 144-153.

[2] 曲立国, 邓亚颂. 基于多传感器的 AGV 定位误差校正方法研究[J]. 中北大学学报: 自然科学版, 2018, 39(6): 780-785, 799.

[3] 夏国标, 陈剑云, 夏孟显. 基于 ZYNQ 的谐波检测系统设计[J]. 华东交通大学学报, 2018, 35(4): 89-96.

[4] 杨文, 赵千川. 基于能量平衡的暖通空调系统故障检测方法[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2017, 57(12): 1 272-1 279.

[5] 徐璐, 柯世堂. 大型冷却塔自振频率估算方法及拟合优度分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(12): 193-198.

[6] 魏仁超, 陈学东, 范志超, 等. FV520B 钢在湿 H₂S+Cl⁻ 环境中的腐蚀疲劳性能[J]. 机械工程学报, 2018, 54(14): 43-49.

[7] 马泽文, 刘涛, 孙旭东. 基于 CFD 的结晶搅拌反应釜流场分析与改进[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(5): 1 900-1 907.

[8] WU Qiao-guo, CHEN Xue-dong, FAN Zhi-chao, et al. Corrosion fatigue behavior of FV520B steel in water and salt-spray environments[J]. Engineering Failure Analysis, 2017, 79(5): 422-430.

[9] 段翔宇, 柳和生, 黄兴元, 等. 不同工艺下反应釜内 PS/CO₂ 均相体系流变性能模拟[J]. 工程塑料应用, 2017, 45(7): 52-55.

[10] 桂挺, 付双成, 袁惠新, 等. 食品工业中挡板对于搪玻璃反应釜固液悬浮的影响研究[J]. 食品工业, 2018, 39(1): 192-196.

[11] 李军, 石青. 基于 KELM 的连续搅拌反应釜模型辨识[J]. 控制工程, 2017, 24(10): 2 137-2 143.

[12] 张玉, 金光远, 崔政伟, 等. 组合浆微波反应釜内流动混合特性数值模拟[J]. 食品与机械, 2018, 34(11): 88-94.

[13] 张慧敏, 胡守明, 孔祥征. 偏心双桨搅拌流场及效果分析[J]. 化学反应工程与工艺, 2017, 33(1): 49-54, 64.

(上接第 69 页)

[9] 张翔宇, 隋嵩, 张德远, 等. 超声振动改善深孔镗削加工质量[J]. 机械工程学报, 2017, 53(19): 143-148.

[10] 赵艳丽, 肖金陵. 激光加工机械手系统工件位姿自动校正的方法[J]. 激光技术, 2015, 39(2): 206-208.

[11] SHA Xiao-peng, LI Hui-guang, LI Wen-chao, et al. Three-dimensional positioning control based on stereo microscopic visual servoing system[J]. Optical Engineering, 2015, 54(1): 977-982.

[12] 崔艳军, 张文峰, 李建欣, 等. 条纹投影三维测量的 Gamma 畸变校正方法[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 153-171.

[13] 杨亮亮, 武晓虎, 史伟民, 等. 基于正交投影迭代学习的高频响闭环运动控制系统模型参数辨识研究[J]. 机械工程学报, 2015, 51(1): 188-195.

[14] 季云峰, 施之皓, 任杰, 等. 基于单目视觉伺服系统的高速旋转球体三维速度测定[J]. 中国体育科技, 2017, 53(2): 139-144.

[15] 尚忠义, 李伟仙, 董明利, 等. 基于四步相移光栅投影的三维形貌测量系统[J]. 应用光学, 2015, 36(4): 584-589.