

一种用于种子分选机的高速并联机械手

Optimizational design and simulation of high-speed parallel manipulator for seed separator

樊 勇 王正灿 王洪斌 石永建

FAN Yong WANG Zheng-can WANG Hong-bin SHI Yong-jian

(天津科技大学机械工程学院, 天津 300222)

(College of Mechanical Engineering of Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300222, China)

摘要:针对种子分选机执行机构速度快、负载低的工作特点,设计出一种高速小型的并联机械手作为种子分选机的执行机构;采用 SolidWorks 和 MATLAB 软件联合仿真技术,建立机械手完整的仿真模型,采用全域性能指标对并联机构进行优化设计;结果显示,在机械手工作范围内的雅克比矩阵的条件数较小,波动平稳,机械手的运动学性能和传动性能均好。研究结果对机械手样机的建立以及控制方法有一定的参考价值。

关键词:种子分选机;并联机械手;MATLAB\SimMechanics;SolidWorks

Abstract: For seed separator actuator working characteristics of the low speed and low load, a small high-speed parallel manipulator was designed as seed separator of actuators. Using SolidWorks and MATLAB software simulation technology, established the simulation model of robot hand fully, and Used full performance indicators to make optimization design for parallel mechanism. The results show that the manipulator work within the scope of the condition number of jacobian matrix is small, smooth fluctuations, and manipulator kinematics performance and driving performance are good. Research on the establishment of the prototype of the manipulator and the control method has certain reference value.

Keywords: seed separator; parallel manipulator; MATLAB\SimMechanics; SolidWorks

传统的种子分选方法只针对于某一种物理特性来达到分选的目的^[1]。新型种子分选采用机器视觉技术可同时对种子的表面形状、缺陷、颜色、体积等重要参数进行高速分选;而执行机构却成为其整体分选效率的瓶颈。

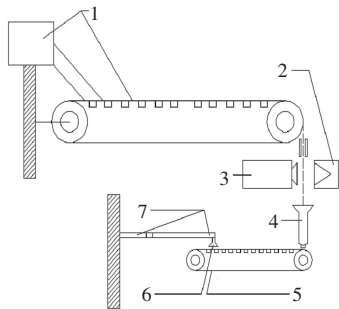
并联机械手因其自身具有刚度质量比大、误差累积、可以实现高速运动等优点,广泛应用于高速分拣、包装、小型

焊接等一些工业领域^[2]。为此本研究设计一种专门用于该分选机的高速、小型并联机械手,并通过其运动空间优化各个杆件的长度;采用 SolidWorks 和 MATLAB 软件联合仿真技术,建立机械手完整的仿真模型,不仅可以直观地显示机械手的各个运动状态,而且可以缩短设计周期、获得运动学和动力学参数^[3],同时对并联机构的设计方法具有一定的参考价值。

1 种子分选机的工作原理及其并联机械手的总体设计

本机械手用在种子分选机上,是种子分选机的执行机构。种子分选机的工作原理见图 1。该种子分选机主要分为 3 部分:① 种子线振排列机构,便于种子依次排列在传送带上进行检测;② 机器视觉机构,用于检测种子的形状、大小、颜色、体积、缺陷等;③ 分选种子的执行机构,即并联机械手。用于将上位机分选好的种子放入指定的位置中。

由图 1 可知,机械手水平放置在工作平面上,气动吸盘固定在机械手的夹持装置上,与机械手正交垂直。当机械手



1. 线阵排列机构 2. 反射镜 3. 工业摄像机 4. 导向机构
5. 种子专用传送带 6. 气动抓取机构 7. 并联机械手

图 1 种子分选机的工作原理

Figure 1 The working principle of seed separator

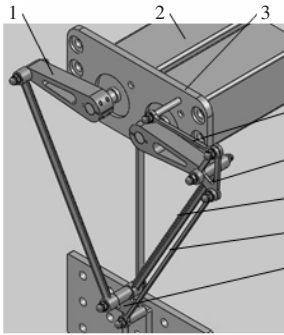
作者简介:樊勇(1959—),男,天津科技大学教授。

E-mail:fanyong@tust.edu.cn

收稿日期:2014-09-15

准备抓取时,该气动手抓的末端会产生负压,将种子吸入到气动手抓上,当机械手运行到种子分选等级的位置时,该气动手抓的末端会产生正压,依靠气流将种子推入到指定的位置中。

平面二自由度并联机械手实体模型的总体结构设计见图 2,该模型由两个运动支链构成,它由两个伺服电机、机架、一组肘架组件、一组定位连杆组件、两个主动臂、从动臂、动平台、执行手爪组成。



1. 主动臂 2. 伺服电机 3. 机架 4. 上定位杆 5. 肘架组件 6. 从动臂 7. 下定位杆 8. 执行手爪(动平台)

图 2 二自由度并联机械手的总体结构

Figure 2 Main structure of the 2-dof parallel manipulator

并联机械手的工作原理:

(1) 并联机械手可由机架上方的螺纹孔固定在所需要的位置,机器主要构件呈现左右对称,分别由两个伺服电机带动各自的主动臂实现往复运动,从而使动平台实现在工作范围内的平动;

(2) 机器右侧的上定位杆、右主动臂同机架与肘架构成一个平行四边形,同时右下侧的定位连杆、肘架、动平台与右侧其中任意一个从动杆构成另外一个平行四边形机构,并且两个平行四边形处于串联的关系,从而限制了动平台的转动。

2 工作空间的确定以及杆长优化

并联机构运动空间的大小决定了并联机器人末端的活动范围,它是衡量并联机器人工作能力的一个重要指标^[4,5]。机器人的工作空间定义为,在结构限制下末端操作器能够达到的所有位置的集合^[6,7]。

如图 3 所示,设主动臂的上极限位置为 θ_{up} ,下极限位置为 θ_{down} ,当右侧主动臂达到上、下极限位置 θ_{up} 、 θ_{down} 时,以 B 点为圆心,以杆长 BC 为半径分别作两段圆弧;当左侧主动臂达到上、下极限位置时,以 B' 点为圆心,以杆长 B'C 为半径分别作两段圆弧。可以看出,4 段圆弧围成一封闭区域,该区域即为机械手在极限转角内所能到达的所有点的集合。机械手所需实际工作空间即可在该区域内选取。

当右侧主动臂处于上极限位置时,选取当杆件 BC 与 x 轴垂直时的 D 点的坐标值为工作空间的右上角极限位置(注意:此时 C 与 D 点重合),由机构的对称性可知,D 点关于 y

轴的对称点 D' 即为工作空间左上角的极限位置;将 BD 向下延长,交区域空间的下极限于 E 点,则 E 点为工作空间右下角的极限点,同理,E' 为工作空间左下角的极限点。图 3 中的阴影区域即为机械手实际的工作区域。

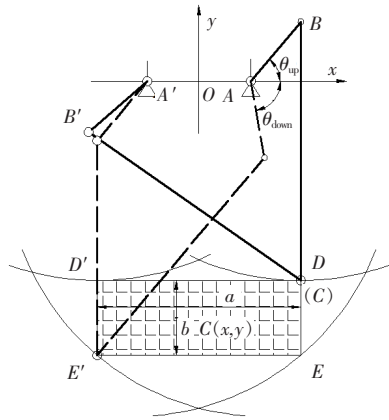


图 3 并联机构工作空间示意图

Figure 3 Schematic diagram of parallel structure's workspace

并联机械手杆长的设计是最基础和重要的环节,关系到机械手整体的操作性能,因此需要采用相关的运动学评价指标构造目标函数,并根据实际工程情况构造相关约束,然后经过优化分析得出其尺度参数。

在杆长优化的评价指标中,雅克比速度矩阵的条件数的平均值是公认的机构运动学的评价指标之一,由于机械手在运动空间中的条件数差异较大,因此条件数的均值并不能反映全局的操作性能,因此应引入一个波动因子,使条件数在合理的范围内波动。

为简化数学模型,将原点 O 设置在两个主动轴线的中点位置,右侧为 x 轴正方向,上侧为 y 轴正方向;A、A' 分别为两个驱动电机的中心轴,并设 $OA = OA' = L_1$;AB、A'B' 分别为右、左主动臂,设其杆长为 $AB = A'B' = L_2$;BC、B'C 分别为右、左从动臂,设其杆长为 $BC = B'C = L_3$;为便于观察,将右侧主动臂与 x 轴正方向所成夹角设为 θ_1 ,左侧主动臂与 x 轴正方向所成夹角设为 θ_2 ,右侧从动臂与 x 轴正方向所成夹角设为 θ_3 ,左侧从动臂与 x 轴正方向所成夹角设为 θ_4 。运动学求解:

设矩阵 A 为

$$A = \begin{vmatrix} \cos\theta_3 & \sin\theta_3 \\ \cos\theta_4 & \sin\theta_4 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{x-L_1-L_2\cos\theta_1}{L_3} & \frac{y-L_2\sin\theta_1}{L_3} \\ \frac{x+L_1-L_2\cos\theta_2}{L_3} & \frac{y-L_2\sin\theta_2}{L_3} \end{vmatrix} \quad (1)$$

设矩阵 B 为

$$B = \begin{vmatrix} L_2\sin\theta_3 \cdot \cos\theta_1 - & 0 \\ L_2\cos\theta_3 \cdot \sin\theta_1 & \\ 0 & L_2\sin\theta_4 \cdot \cos\theta_2 - \\ & L_2\cos\theta_4 \cdot \sin\theta_2 \end{vmatrix} \quad (2)$$

令

$$\boldsymbol{J}=\boldsymbol{A}^{-1}\boldsymbol{B} \tag{3}$$

则

$$\boldsymbol{v}=\boldsymbol{J}\dot{\boldsymbol{\theta}} \tag{4}$$

式中:

$\boldsymbol{J}$ ——雅克比矩阵^[8];

$\|\boldsymbol{J}\|\cdot\|\boldsymbol{J}^{-1}\|$ ——雅克比矩阵的条件数^[9],是衡量机器人灵巧度以及操作精度的一个重要性能指标^[10-12]。

为简化运算,可以将既定的工作空间划分为 p 行 q 列,则可表示出所划分空间中的所有节点:

$$C(x_i,y_j)=[-L_3-L_1\cos\theta_{up}+(i-1)\frac{a}{q-1}-\sqrt{L_2^2-(-L_3-L_1\cos\theta_{up}-L_1\cos\theta_{down}-L_3)^2-L_1\sin\theta_{down}}+(j-1)\frac{b}{p-1}] \tag{5}$$

式中:

i,j ——第 i 行 j 列的坐标点。

该机械手实际工作空间的长度为 120 mm,宽度为

60 mm 的矩形区域;为避开边界位置,长度方向预增 3 mm 的距离作为余量,则上边界的实际范围在 120~125 mm,方可认为满足条件;另外考虑到其宽度,则设比例系数 λ ,使得 λ 满足以下关系:

$$\frac{a}{b}-0.1\leqslant\lambda\leqslant\frac{a}{b}+0.1 \tag{6}$$

最终优化的目标函数为

$$\zeta=(L,r)\longrightarrow\max \tag{7}$$

其中:

$$\bar{\zeta}=\bar{\zeta}-\tilde{\zeta};$$

$$\bar{\zeta}=\frac{\int_W\zeta dW}{\int_WdW}=\frac{\sum_{p=1}^p\sum_{q=1}^q\zeta_{pq}}{p\cdot q}(\zeta_{pq}\text{ 由雅克比矩阵求得});$$

$$\tilde{\zeta}=\kappa\sigma_{\zeta}(\sigma_{\zeta}\text{ 为 }\sum_{p=1}^p\sum_{q=1}^q\zeta_{pq}\text{ 的标准差});$$

$$L=(L_1,L_2,L_3),r=(x,y);$$

取 $p=q=50$ 。

优化结果见表 1。

表 1 优化结果清单

Table 1 List of optimization results

优化结果	杆长 L_1	杆长 L_2	杆长 L_3	上极限转角 $\tilde{\zeta}$	下极限转角 θ_{down}
归一化值	0.095	0.235	0.67	42	83.5
实际数值	22.0 mm	54.422 mm	155.16 mm	42 °	83.5 °
圆整后值	22.0 mm	55.0 mm	155.0 mm	42 °	83.5 °

优化结果	工作空间长度 a	工作空间宽度 b	平均条件数倒 $\bar{\zeta}$	波动量 $\tilde{\zeta}$	目标函数值 ζ
归一化值	0.539 3	0.264 6	0.626 2	0.071 9	0.554 3
实际数值	124.89 mm	61.28 mm	0.626 2	0.071 9	0.554 3
圆整后值	125.75 mm	61.852 mm	0.631 3	0.070 7	0.560 5

图 4 显示了全域条件数在圆整和参数归一化处理后在空间的分布状况。由图 4 可知,雅克比矩阵的条件数为 1~3;其波动量比较小且没有很大的突变。说明操作性能较好。

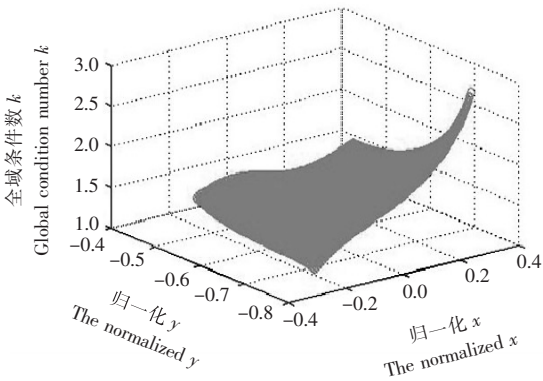


图 4 归一化后的全域条件数

3 MATLAB 仿真

3.1 仿真平台的搭建

SimMechanics Links 插件是连接 MATLAB 与三维模型之间的重要桥梁,在安装该插件之前,电脑上需要安装 MATLAB 软件和软件所支持的 CAD 平台。当前 SimMechanics Links 支持以下平台:SolidWorks 平台、Autodesk Inventor 平台和 PTC Creo Pro/ENGINEER 平台。需要说明的是 SimMechanics Links 插件与 MATLAB 的版本必须相同。

3.2 实体仿真操作流程

各操作流程见图 5。

为减小主动臂的转动惯量,宜选用质量小、硬度大的材料,考虑到平面二自由度并联机械手应用于高速抓放场合,采用轻质的 LY12 硬质铝合金材料代替传统的碳钢材料,在

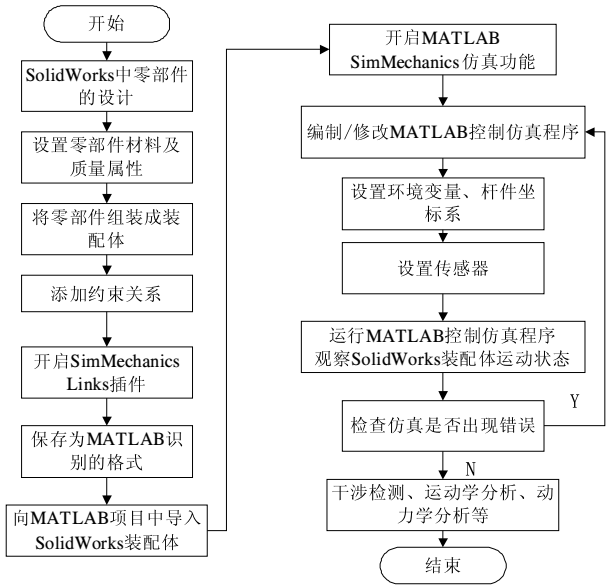


图 5 联合仿真操作步骤

Figure 5 Steps of united simulation operations

不影响刚度的条件下大大降低了运动部件的重量。LY12 铝合金材料,其中国国标代号为 2A12。LY12 硬质铝合金材料密度小,仅为 2.78 g/cm^3 ,约为铁的 $1/3$;强度高,抗拉强度 $\sigma_b > 425\text{ MPa}$,条件屈服强度 $\sigma_{0.2} > 275\text{ MPa}$ 。

在 MATLAB 的机械环境设置中,考虑到机械手的工作位置为水平放置,即平行于传送带,因此需要设置整个机构的重力加速度为 Z 轴方向,即 $(0,0,-9.81)$ 。

3.3 编写 MATLAB 仿真程序

为便于对仿真模块分析以及参数预估,需要对三维模型进行简化:① 将轴承、螺帽等一些小零件与相邻的杆件视作一个零件处理,即在 SolidWorks 装配中作为一个子装配体;② 忽略各个转动副之间的摩擦力;③ 将各个杆件视作刚体;④ 合理设置 MATLAB 中世界坐标系与装配体坐标系之间的对应关系。简化后的 MATLAB 模型见图 6。

3.4 设定仿真轨迹

控制轨迹主要是根据并联机械手实际的工作要求来设

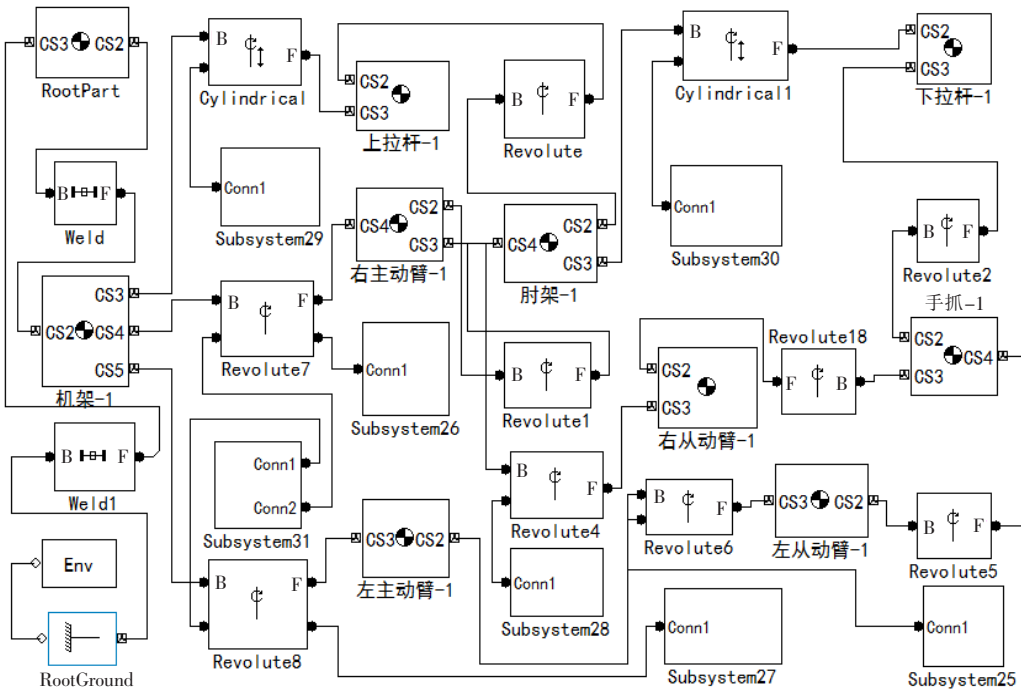


图 6 MATLAB 仿真模型

Figure 6 MATLAB simulation model

定。考虑到该机械手用于种子的分选,机械手需要从传送带上拾取种子,然后将其放在相应的等级分拣处,如图 7 所示。种子经过线阵机构输送至传送带,在传送带的带动下将种子运往 A 点;B 点为机械手的执行末端的初始化零点,即上电后用于调整机械手的初始姿态。开始工作后,机械手根据指令运行到 A 点,并拾取该处的种子,将其放置到 1~12 的某一个分拣位置中。

考虑机械手的初始和停止速度为零,对于高速运行的机构,为减小机构的惯性力,初始的加速度不宜有突变,也应该为零,同理终止加速度也为零;为保证机构在运行过程中无冲击,速度加速度曲线应该平滑过渡。转换成数学语言则为,位移曲线函数对时间的一阶导连续,二阶导连续,三阶导有上限。因此可以采用 3—4—5 多项式曲线对机械手进行加减速控制。

轨迹点共有 A、B、1~12 共 14 个,其运行路径共有 13 条,这里将采用仿真软件对这 13 条轨迹进行综合仿真,其总的轨迹见图 8。

4 仿真结果分析

MATLAB 机械手仿真可视化界面见图 9。

4.1 主要关节运动学仿真结果

机械手的主动臂的运动学以及动力学参数是设计主动臂、伺服电机选型的重要依据。利用 MATLAB 中的相关传

感器可得到其运动学、动力学参数。图 10、11 给出了右驱动臂的角位移。

由图 10、11 可知,右主动臂的角位移范围大约为 -60.8° 到 26.2° ,左主动臂的角位移范围约为 153.9° 到 240.8° ,均符合并联机械手的主动臂的空间运动范围。

4.2 主要关节动力学仿真结果

图 12、13 分别给出了右、左主动臂的扭矩,通过其最大峰值,可初步预测伺服电机的扭矩、功率等参数,也可通过作用在主动臂上的扭矩,对主动臂进行有限元分析,观察其强度是否满足要求。

由图 12、13 可知,左右主动臂的最大峰值约 $0.05\text{ N}\cdot\text{m}$,可为伺服电机的选型提供依据。

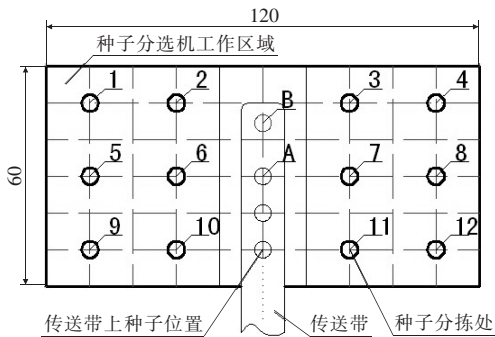


图 7 机械手分拣平台示意图

Figure 7 Schematic diagram of manipulator sorting platform

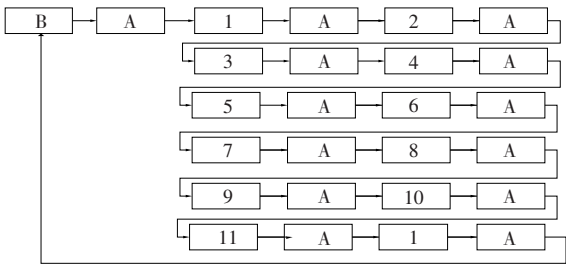
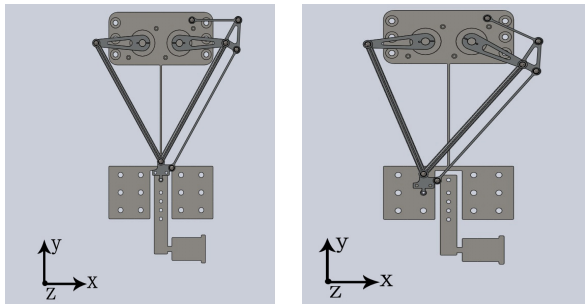


图 8 机械手运行总轨迹示意图

Figure 8 Schematic diagram of total trajectory of manipulator



(a) 机械手仿真图形界面—B 点

(b) 机械手仿真图形界面—抓取过程

图 9 机械手仿真运行图形界面

Figure 9 Graphical interface of manipulator simulation

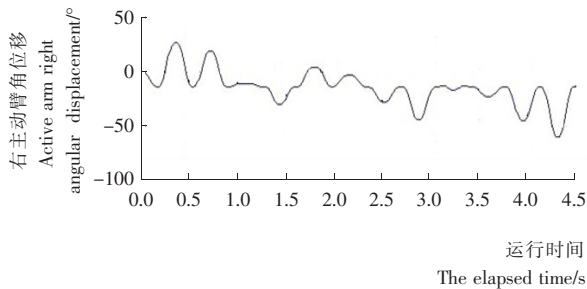


图 10 右侧主动臂角位移曲线图

Figure 10 Curve of angular displacement of right active arm

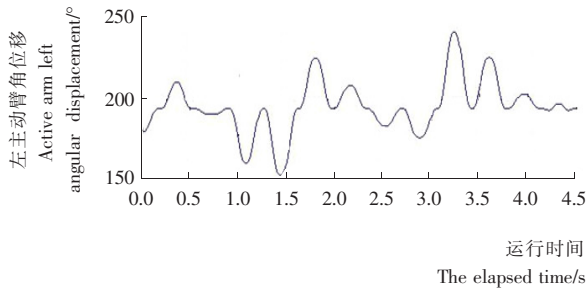


图 11 左侧主动臂角位移曲线图

Figure 11 Curve of angular displacement of left active arm

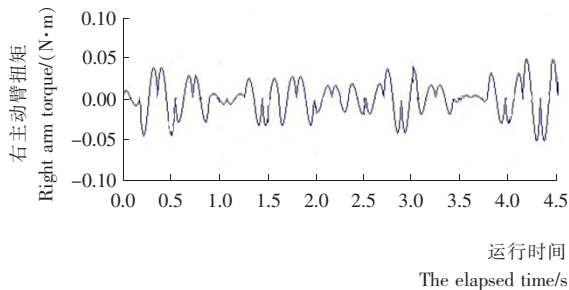


图 12 右侧主动臂扭矩曲线图

Figure 12 Curve of torque of the right active arm

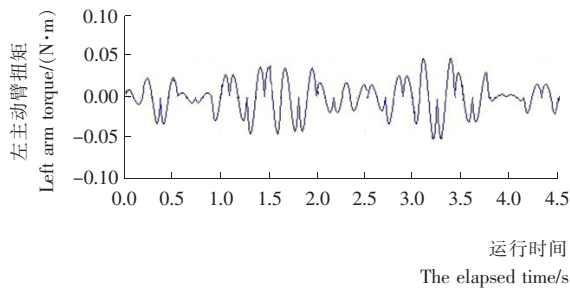


图 13 左侧主动臂扭矩曲线图

Figure 13 Curve of torque of the left active arm

5 结论

(1) 本研究针对种子分选机执行机构速度快、负载低的工作特点,设计出一种高速小型的并联机械手作为种子分选机的执行机构;

(2) 采用全域性能指标对并联机构的各个杆长进行了优化设计,结果显示,在机械手工作范围内的雅克比矩阵的条件数较小,并且波动平稳,说明机械手的运动学性能较好;并始终使主动臂与从动臂之间的传动角在 40°以上,确保了其较好的传动性能,有效地避免了奇异点的发生。

(3) 采用 SolidWorks 和 MATLAB 联合仿真技术对机械手进行了运动学和动力学仿真;根据仿真结果,利用 MATLAB 的图形显示功能对并联机械手执行结构的轨迹进行了主动臂角位移和扭矩的分析,并预估了伺服电机的参数;对机械手样机的建立以及控制方法有重要的指导作用;同时对同类型机械手产品的设计具有一定的借鉴作用。

(上接第 22 页)

组成。根据王永霞^[14]的介绍这些细菌降低了香肠的 pH 且还原了亚硝酸盐,对发酵香肠的质地有明显影响。传统的自然发酵香肠风味往往是乳酸菌、酵母等优势菌与其它杂菌竞争的结果,受季节、地区等外界环境的影响不易大规模生产。通过生理生化与基因鉴定方法,可以得到自然发酵香肠中的优势菌,为模拟自然发酵的风味提供了基础。

参考文献

1 葛长荣,马美湖.肉与肉制品工艺学[M].北京:中国轻工业出版社,2002:25~30.
2 南庆贤.肉类工业手册[M].北京:中国轻工业出版社,2003:42~48.
3 刘会平,成文生.发酵肉制品的生产[J].肉类工业,1999(4):16~18.
4 李凤彩,程文新,谢华,等.发酵香肠菌种筛选标准探讨[J].食品科技,2002(6):78~79.
5 曲佳乐,闵伟红,王巧玲,等.一株产木糖醇菌株的生理生化及分子生物学鉴定[J].食品科学,2011,32(12):171~175.
6 乔宏萍,沙大年,金泰虞,等.红茶菌中优势微生物的分离鉴定及

参考文献

1 颜克涛.台面式种子分选机的分选机理和小麦分选试验研究[D].武汉:华中农业大学,2005.
2 李占贤.基于 PLC 的高速并联机械手控制技术[J].智能控制技术,2006,35(21):55~57.
3 褚金钱,徐方.基于 Solidworks 与 Matlab 的码垛机器人动力学仿真[J].组合机床与自动化加工技术,2013(9):28~31.
4 周双林.平面闭链五杆机构柔性工作空间的研究[J].机械工程学报,2000,36(11):98~99.
5 赵登峰.平面五杆机构工作空间及其演化的研究[J].机械设计与研究,2007,23(5):56~58.
6 梁香宁,牛志刚.三自由度 Delta 并联机器人运动学分析及工作空间求解[J].太原理工大学学报,2008(1):93~96.
7 曲义远,黄真.空间六自由度并联机构位置的三维搜索方法[J].机器人,1989,3(5):128~130.
8 石磊,许明恒,邓维鑫,等. PowerCube 模块化机器人工作空间计算[J].中国工程机械学报,2011,9(1):88~90.
9 Angeles J. Architecture singularities of parallel manipulators [J]. International Journal of Robotics & Automation, 1992, 7 (1): 23~29.
10 米士彬,金振林.基于雅克比矩阵求解并联机器人位置正解方法[J].燕山大学学报,2011,59(2):391~395.
11 汪军.双臂机器人运动学与可操作性及其优化的研究[D].无锡:江南大学,2007.
12 李维嘉. Stewart 运动平台的雅可比矩阵条件数的研究[J].华中理工大学学报,1997,11(3):34~36.

系统发育分析[J].食品与生物技术学报,2011,30(4):609~612.
7 胡佳,邓斌,张文学,等.浓香型白酒曲药中细菌组成及系统学分析[J].酿酒科技,2007(5):17~19.
8 F 奥斯伯.精编分子生物学实验指南[M].北京:科学出版社,1998:95~100.
9 Yeates C, Gillings M R, Davison A D, et al. Veal methods for microbial DNA extraction from soil for PCR amplification[J]. Biological Procedures Online, 1998, 1(1): 14~16.
10 Judith Meis, Chen Feng-Ling. Extract PCR-ready soil DNA in less than an hour with the new soil master DNA extraction kit [J]. Epicentre Forum, 2002, 9(2): 1~3.
11 雷华威,李榕,樊康,等.不同菌种对中式发酵香肠风味的影响[J].食品与机械,2011,27(5):19~24.
12 王令建,李开雄.发酵香肠菌种的筛选及鉴定[J].现代食品科技,2006,22(2):24~27.
13 罗欣,朱燕.发酵剂微生物及其代谢与发酵香肠的工艺控制[J].食品与发酵工业,2002,28(3):67~71.
14 王永霞,曹东林,宋慧月,等.不同发酵剂对发酵香肠色泽和质地的影响[J].食品与机械,2006,22(1):4~6.