

DOI: 10.3969/j.issn.1001-4551.2017.10.006

基于蒙特卡洛法的卸胎机械手重复定位精度分析

刘 瑞, 仝西萌, 田仲可*

(青岛科技大学 机电工程学院, 山东 青岛 266061)

摘要: 针对卸胎机械手的重复定位精度问题, 对卸胎机械手进行了在 3 个铰接部位联合作用下的参数化仿真分析研究, 同时对卸胎机械手在有无铰间隙两种条件下对位置、速度、加速度 3 个方面作了比较。运用 Pro/E 三维建模建立卸胎机械手的实体模型, 通过 Matlab 编程得到了卸胎机械手铰间隙的 1 000 组服从正态分布的随机抽样数据, 再将实体模型与得到的参数化数据导入到 ADAMS 中进行了动力学仿真分析, 获得了卸胎机械手在运动过程中的运动变化曲线及位置变化数据。基于蒙特卡洛方法通过计算概率得出了铰间隙大小对卸胎机械手定位精度影响的可靠度。研究表明: 存在铰间隙的情况下, 卸胎机械手在位置、速度和加速度 3 个方面都有一定的变化, 且当许用偏差值 $-0.25\text{ mm} < \mu < 0.25\text{ mm}$ 时, 卸胎机械手的定位精度可靠性是可以得到保证的。

关键词: 机械手; 铰间隙; 蒙特卡洛法; ADAMS; 精度

中图分类号: TH122; TH39

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2017)10-1112-05

Analysis of repetitive positioning accuracy of unloading manipulator based on Monte Carlo method

LIU Rui, TONG Xi-meng, TIAN Zhong-ke

(Mechanical and Electrical Engineering College, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China)

Abstract: Aiming at the problem of repeated positioning accuracy of the unloading robot, the parametric simulation analysis of the unloading robot under the joint condition of the three hinged parts was carried out. At the same time, the position and velocity of the unloading robot were respectively. And the acceleration of the three parts of the use of Pro/E three-dimensional modeling of the establishment of the physical model of tire unloading robot, through the Matlab program to get unloading robot hinge of the 1 000 group obey the normal distribution of random sampling data, and then the solid model and the obtained parameterized data was introduced into ADAMS for dynamic simulation analysis to obtain the movement curve and position change data of the unloading robot during the movement. Based on the Monte Carlo method, the probability of the dumping gap was obtained by calculating the probability. The results indicate that there are some changes in position, velocity and acceleration in the case of hinge, and when the allowable deviation is $-0.25\text{ mm} < \mu < 0.25\text{ mm}$, the reliability of the positioning accuracy of the tire manipulator can be guaranteed.

Key words: manipulator; hinge clearance; Monte Carlo method; ADAMS; accuracy

0 引 言

机械手是近代自动控制领域的一项新技术,随着工

业自动化的迅速发展,工业机械手的应用水平已经成为现代企业生产水平的重要标志。通过利用机械手代替人的繁重劳动对工件进行装卸和传送,实现了生产率的提

收稿日期: 2017-01-09

作者简介: 刘 瑞 (1989-), 男, 山东泰安人, 硕士研究生, 主要从事虚拟仿真与智能化设计方面的研究。E-mail: 1063952428@qq.com

通信联系人: 田仲可, 男, 博士, 副教授, 硕士生导师。E-mail: tianzhongke@qust.edu.cn

高,降低了成产成本,使生产过程的自动化水平得到提高。目前,工业机械手广泛应用于各种制造行业中。随着社会生产的进一步发展和科学技术的进步,工业机械手的功能和性能将进一步得到改善和提高,因此工业机械手的应用领域将越来越广^[1-2]。机械手的定位精度是机械手在运行工作中的重中之重。机械手的定位精度与机构运动可靠性密切相关。对于刚体机械机构,由于引起运动误差的因素繁多,常规方法很难列出在误差源综合作用下的应用模型,为此学术界发展了多刚体机构误差综合数学模型,即误差传递模型^[3]。2015 年哈尔滨工业大学刘永猛^[4]建立了光刻机 H 型双驱动超精密工件台误差传递模型,并通过蒙特卡洛法对在各种误差源同时作用情况下的定位精度进行了不确定度评定。目前,对于机械手精度分析大多只是进行单纯的 ADAMS 运动仿真,对于研究其综合不确定因素还很少。笔者所研究的卸胎机械手是在多个铰接部位联合作用下对其进行的定位精度可靠性分析,单纯的方法提取的数据不具有随机性且得到的结果不具有说服力,蒙特卡洛法能够比较逼真地描述具有随机性质的事物特点及实验过程、受几何条件限制小同时具有计算多个方案与未知量的能力并且误差容易确定、设计程序简单且易于实现等特点。

本研究将利用蒙特卡洛法获取 1 000 组卸胎机械手多处铰间隙的随机数据,再通过 ADAMS 仿真软件在多处铰间隙误差同时作用的情况下对卸胎机械手进行运动仿真,得出仿真曲线图并提取仿真数据,以此研究分析铰间隙对机械手重复定位精度的影响。

1 卸胎机械手模型的建立

1.1 卸胎机械手三维实体模型的建立

本研究利用 Pro/E 三维绘图软件绘制出卸胎机械手并导入到 ADAMS 仿真分析软件中进行后续工作^[5],三维模型如图 1 所示。

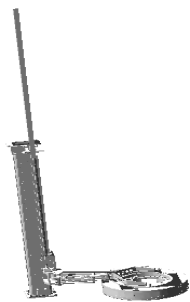


图 1 卸胎机械手的三维模型

该卸胎机械手可完成的基本动作是末端件手腕部分的抓取,小臂的回转运动,以及大臂的在竖直方向上的平移运动。

1.2 创建约束

本文通过各种约束来限制构件之间的某些相对运动,并以此将不同的构件组成一个机械系统^[6-8]。以建立卸胎机械手底座与大地之间的固定副为例,选择两体一点构建约束的方式构建大地和机械手底座的固定约束,第一个物体选择大地,第二个物体选择机械手底座,在底座上选择任一点,建立起基本的固定副约束如图 2 所示。

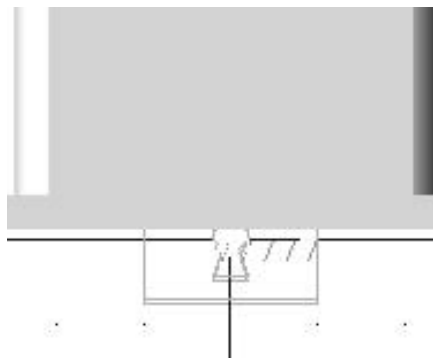


图 2 底座与大地的固定副约束

对于卸胎机械手,除了必要的固定约束外,还需要滑动副约束和铰间隙之间发生碰撞需要的平面运动约束,笔者创建的模型约束如表 1 所示。

表 1 卸胎机械手的约束副

约束副类型	约束构件
固定副	Body7,body16
固定副	Body12,body15
固定副	Part25,body15
固定副	Part27,body15
固定副	Part26,part31
固定副	Part29,part31
固定副	Body16,ground
平面运动	Part25,part26
平面运动	Part27,part28
平面运动	Part29,part30
滑动副	Body15,body16

1.3 创建驱动

笔者根据卸胎机械手的运动,定义了以下驱动函数:

(1) 滑动副上添加直线驱动

if(time-10:STEP5(time, 5, 0, 10, 200), 2 000, STEP5(time, 20, 2 000, 25, 0));

(2) 铰间隙平面运动上添加点驱动

if(time-10.0: STEP5(time, 0, 0, 5, -60 d), -60 d, STEP5(time, 15, -60 d, 20, 0));

(3) 大盘间隙平面上添加点驱动

if(time-15: STEP5(time, 10, 0, 15, 90 d), 90 d, STEP5(time, 25, 90 d, 30, 0))。

机械手首先是腕关节抓取轮胎, 顺时针旋转 90°, 然后上升到 2 000 mm 的位置, 接着逆时针旋转 60°, 随后按照上述动作的相反过程回到原点。

2 机械手中蒙特卡洛法的运用

蒙特卡洛法是以统计抽样理论为基础, 用随机数对有关独立随机变量进行抽样实验或随机模拟, 以求得随机函数的函数值、统计特征值(如均值、概率等)和分布, 作为待解问题的数值解, 是求解工程技术问题近似解的一种数值计算方法^[9]。基本分析步骤如下:

(1) 产生随机数;

(2) 进行仿真并提取结果;

(3) 通过仿真结果的计算得出误差的分布参数(均值和误差);

(4) 代入公式计算机械手位移的可靠度。

卸胎机械手运动可靠性的仿真流程如图 3 所示。

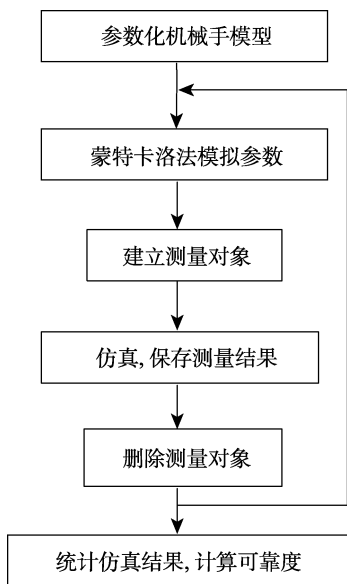


图 3 卸胎机械手运动可靠性仿真流程图

根据卸胎机械手实际运动情况, 本研究主要从铰间隙方面来考虑卸胎机械手的可靠性问题。

2.1 机械手铰间隙的参数化

本研究把卸胎机械手铰接部分的轴和孔定义为参数, 通过轴和孔的半径大小参数化来实现铰间隙的变化, 卸胎机械手铰间隙的参数化如表 2 所示^[10]。

表 2 卸胎机械手的参数化变量

参数化名称	标准值/mm	说明
DV_1	20	小孔半径
DV_2	20	小轴半径
DV_3	30	大孔半径
DV_4	30	大轴半径
DV_5	500	末端孔半径
DV_6	500	末端轴半径

2.2 蒙特卡洛法产生随机数

蒙特卡洛法中重要的一步是产生随机数。产生随机变量的基础是产生[0, 1]区间上均匀分布的随机数。其他各类分布如正态分布、对数正态分布、泊松分布等, 都是通过[0, 1]区间上的均匀分布进行变换得到。获得均匀分布的随机数后, 可以用多种方法构造基于该随机数的随机变量。

加工制造中轴和孔的误差是随机的, 假设轴和孔的误差分布服从正态分布, 利用 Matlab 软件可以生成服从正态分布的随机数据, 以供选取, 来改变参数化后轴孔的数值。

本研究根据国家标准(GB/T 1800.4-1999)选定孔轴配合均选择 $\frac{H7}{f6}$ 的公差配合^[11], 笔者以直径 40 mm 的轴(上偏差为-0.025 mm, 下偏差为-0.041 mm)为例, 其随机抽样代码如下所示:

```

>> E=40-(.041+.025)/2;
>> sigma=(0.041-.025)/6;
>> x=normrnd(E,sigma,1000,1);
>> hist(x,20)
    
```

其产生的数据正态分布图如图 4 所示。

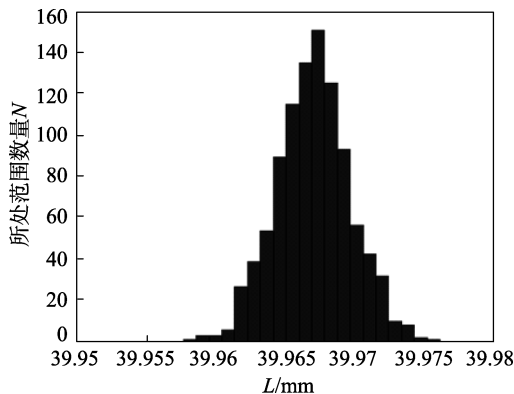


图 4 直径 40 mm 轴的数据正态分布图

类似地, 可以得到其他孔、轴的随机抽样数。

3 进行仿真并提取仿真数据

3.1 进行仿真

本研究根据卸胎机械手的实际运动情况, 设置仿真时间为 30 s, 仿真步数位 500 步进行仿真。

3.2 提取仿真结果并分析

本研究利用 ADAMS/View 里的 Postprocessor 板块可以进行仿真曲线的生成与导出文件^[12], 产生仿真文件, 保存到指定文件夹里, 分析处理后, 进行可靠度的计算。

通过曲线可以形象地说明各种随机因素对仿真结果的影响, 其中包括位移、速度、加速度。本研究选取卸胎机械手末端旋转中心点为参考点来提取结果, 所提取的结果图像如图 (5~8) 所示。

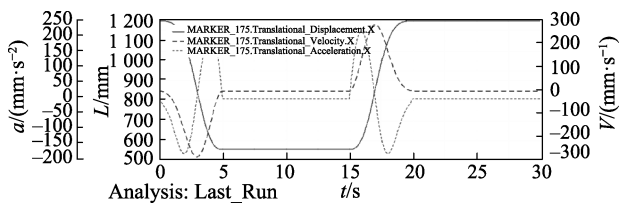


图 5 无间隙时的位置、速度和加速度变化图

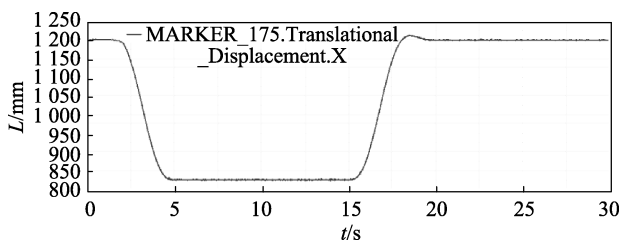


图 6 有间隙时的位置变化图

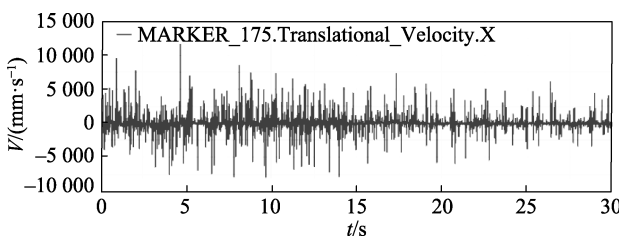


图 7 有间隙时的速度变化图

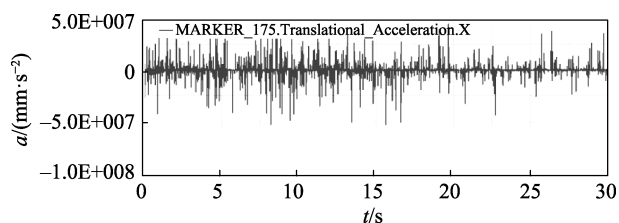


图 8 有间隙时的加速度变化图

由图 5 中的位移变化图与图 6 比较可以看出当轴和孔之间有间隙时, 末端件腕关节的位置发生了微小的波动, 不再是平滑的线条。提取仿真结束时末端件腕关节的位置数据可以看出其发生了改变, 经计算 $\Delta X_i = (X_i - X_0)$ 数据如表 3 所示。

表 3 卸胎机械手末端位移误差

仿真次数	位移误差 $\Delta X_i/\text{mm}$
1	0.019 5
2	0.018 7
3	0.011 6
4	0.098 8
5	0.108 8
6	0.060 8
7	0.139 6
8	0.001 1
.....	
999	0.155 4
1 000	0.013 7

数据表明间隙的存在对机构运动的位置可靠性存在影响。

图 5 中的速度变化曲线与图 7 相比表明, 无铰间隙时不发生碰撞, 速度平稳的过渡; 存在铰间隙时, 由于轴与孔之间不断地相互碰撞, 其速度不再是平稳地过渡而是不断剧烈地发生变化。

从图 5 中加速度的变化曲线图和图 8 相对比可以清晰的看出, 无铰间隙存在时, 加速度变化平稳, 大约在 $0 \sim 160 \text{ mm/s}^2$ 之间变化; 存在铰间隙的情况下, 加速度在相互碰撞力的影响下变化幅度比较剧烈。

通过上述变化图对比分析可以得出, 当存在铰间隙时, 卸胎机械手在位移、速度和加速度方面都有不同程度的变化, 这就要求在制造、装配过程中要注意铰间隙的合理取值, 以确保机械手的运动精度。

3.3 位置可靠度的计算

由于在机械制造过程中存在误差是不可避免的, 而且误差的大小也是随机的。笔者选取 1 000 组铰间隙数据分别代入到卸胎机械手模型中进行仿真, 通过提取仿真数据来计算它的位移精度。本文所考虑的铰间隙误差认为服从正态分布, 其可靠度的计算公式为^[13]:

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta X_i \quad (1)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta X_i - \mu)^2 \quad (2)$$

$$P = \int_{-\beta}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\mu^2}{2}} du = \Phi(\beta) \quad (3)$$

在 Matlab 中编写程序进行计算, 首先计算出 β 值, 再计算可靠度, 程序代码如下^[14]:

```
>> syms u
f=exp(-u.^2/2).*/sqrt(2*pi);
int(f,u,-beta,1000);
>>ans
其中:
```

$$\beta = \frac{\mu_z}{\sigma_z} = \frac{\mu_0 - \mu}{\sqrt{\sigma_0^2 + \sigma^2}} \quad (4)$$

式中: μ_0 , σ_0 —允许极限误差的分布特征值; μ , σ —仿真运算结果算出的误差分布特征值。

经计算, 得出特定重复位置精度下的概率如下:

$P(-0.05 \text{ mm} < \mu < 0.05 \text{ mm}) = 85.00\%$;

$P(-0.10 \text{ mm} < \mu < 0.10 \text{ mm}) = 95.90\%$;

$P(-0.15 \text{ mm} < \mu < 0.15 \text{ mm}) = 97.95\%$;

$P(-0.20 \text{ mm} < \mu < 0.20 \text{ mm}) = 99.97\%$;

$P(-0.25 \text{ mm} < \mu < 0.25 \text{ mm}) = 99.99\%$ 。

4 结束语

本研究利用 Monte Carlo 方法来实现铰接副的随机抽样, 通过 Matlab 软件编写程序代码得到铰间隙 1 000 组随机数据, 分别代入到卸胎机械手模型中, 进行仿真分析。在 ADAMS 后处理模块中得到仿真曲线变化图, 提取位移仿真数据, 然后通过计算概率得到卸胎机械手的可靠度数据。

与理想配合状态下的卸胎机械手相比, 含铰间隙的卸胎机械手在位移、速度和加速度都会发生偏差。本研究定量分析了特定重复位置精度下的概率另外, 考虑到机构使用过程中的磨损也会引起铰间隙的改变, 为此也需要在设计与制造环节加以必要考虑与控制。

参考文献(References):

- [1] 郭洪武. 浅析机械手的应用与发展趋势[J]. 中国西部科技, 2012, 11(10): 3.
- [2] 周 舟, 王 俊. 采摘机器人机械臂的控制与联合仿真[J]. 电子技术, 2013(1): 60-62.
- [3] 袁茂强, 王永强, 王 力, 等. 基于蒙特卡洛法的 3D 打印机定位精度分析[J]. 机床与液压, 2016, 44(21): 141-146.
- [4] LIU Yong-meng, YUAN Mao-qiang, GAO Jie-ru, et al. Evaluation of measurement uncertainty in H-drive stage during high acceleration based on Monte Carlo method[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2015, 93(5): 1-9.
- [5] 韩文东. 基于 PROE 和 ADAMS 的薄煤层液压支架建模与仿真[J]. 中国新技术新产品, 2010(5): 143.
- [6] 张 静, 许东来. ADAMS 在并联机构运动学分析中的应用[J]. 机电工程, 2010, 27(9): 57-60.
- [7] 陈立威, 范纪华, 范东祥, 等. 基于有限元的连杆运动与静力分析[J]. 机械, 2016, 44(12): 1-5, 59.
- [8] 王铁军. 基于 ADAMS 的串联机器人的运动可靠性仿真[D]. 沈阳: 东北大学机械与自动化学院, 2006.
- [9] 郭鹏飞, 阎绍泽. 含间隙四连杆机构运动误差的 Monte Carlo 模拟[J]. 清华大学学报, 2007, 47(11): 14-36.
- [10] 李 彬, 郭雯侠, 赵新华. 基于 ADAMS 的并联机器人参数化设计与仿真[J]. 天津理工大学学报, 2009, 25(6): 28-30.
- [11] 于 峰. 机械精度设计与测量技术[M]. 北京: 北京大学出版社, 2008.
- [12] 龚建球, 刘守斌. 基于 ADAMS 和 MATLAB 的自平衡机器人的仿真[J]. 机电工程, 2008, 25(2): 8-11.
- [13] 孙志礼, 姬广振. 机构运动可靠性与分析技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.
- [14] 陈 明, 郑彩云, 张 铮. Matlab 函数和实例速查手册[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2014.

[编辑: 李 辉]

本文引用格式:

刘 瑞, 仝西萌, 田仲可. 基于蒙特卡洛法的卸胎机械手重复定位精度分析[J]. 机电工程, 2017, 34(10): 1112-1116.

LIU Rui, TONG Xi-meng, TIAN Zhong-ke. Analysis of repetitive positioning accuracy of unloading manipulator based on Monte Carlo method[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2017, 34(10): 1112-1116.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>