

马鞍型并联跟踪台的仿真设计

刘 峰, 王向军, 许 薇, 张召才

(天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

摘要: 为了提高并联机构仿真设计速度, 以马鞍型并联跟踪台为研究对象, 提出了编写 Matlab 仿真程序与 ADAMS 仿真分析相结合的仿真设计方法。通过编写 Matlab 仿真程序对马鞍型并联跟踪台进行了优化设计, 利用得到的优化设计尺寸进行三维造型后, 导入 ADAMS 分析环境下进行仿真分析, 依据得到的仿真结果研制出马鞍型并联跟踪台实验样机。通过编写数据监测模块程序对实验样机各驱动杆速度进行监测, 并将监测结果与仿真结果进行对比, 验证了仿真结果的正确性。研究表明, 该仿真设计方法能够避免仿真设计过程中重复进行三维造型的问题, 与现有方法相比, 仿真设计周期缩短了近一半。

关 键 词: 马鞍型并联跟踪台; 仿真设计; 实验验证

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A

Simulation design of saddle-shaped parallel tracking platform

LIU Feng, WANG Xiang-jun, XU Wei, ZHANG Zhao-cai

(State Laboratory of Precision Measurement Technology and Instrument, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In order to improve the simulation design velocity of parallel device, a simulation design method combining the Matlab simulation code with the ADAMS simulation analysis was presented for the saddle-shaped parallel tracking platform. By compiling the Matlab simulation code to optimize the saddle-shaped parallel tracking platform and by using the optimum design size to realize the 3D reconstruction, the 3D model was analyzed in the ADAMS environment and the saddle-shaped parallel tracking platform experiment sample was manufactured by using the simulation result. The correctness of the simulation results were proved by compiling the data monitor module to monitor the velocity of experimental sample drive poles and comparing the monitor results and the simulation results. The results show that this simulation design method can solve the problem of repeated 3D reconstruction and the simulation design period is half that of the current method.

Key words: saddle-shaped parallel tracking platform; simulation design; experimental verification

1 引言

仿真设计是实现并联机构(如并联机床、并联机器人和并联跟踪系统等)设计的关键环节,其仿真结果能够为并联机构的设计提供重要的理论依据。目前,对并联机构进行仿真设计的方法主要有三种:第一种是通过编写 Matlab 仿真程序对并联机构进行仿真设计,该方法能够实现并联机构仿真的可视化,但只能针对简化的并联机构进行仿真^[1];第二种方法是在 ADAMS 软件环境下,使用零件库对并联机构进行三维造型,造型完成后利用仿真功能完成并联机构的仿真,如仿真结果不满足要求,对三维模型的几何尺寸进行参数化调整,调整后即可获得优化的三维模型尺寸,最后输出仿真结果。与第一种方法相比,该方法能够对并联机构三维模型进行仿真并能够得到优化的仿真结果,但由于 ADAMS 软件不能进行精确的三维造型,所以仿真结果也不够精确;第三种方法是通过 CAD 软件和 ADAMS 软件配合使用对并联机构进行仿真,该方法是目前普遍采用的方法,其原理是首先利用 CAD 软件对并联机构进行三维造型,而后再将三维模型导入到 ADAMS 环境下进行仿真,如仿真结果不满足要求,则需要重新进行三维造型再导入到 ADAMS 环境下进行分析,直到仿真结果满足要求时,输出仿真结果^[2]。该方法克服了第二种方法的不足,但由于仿真过程中需要重复进行三维造型,设计周期长。

为了解决上述问题,以马鞍型并联跟踪台为研究对象,提出了通过编写 Matlab 仿真程序和 ADAMS 仿真分析相结合的仿真设计方法。该方法首先将跟踪台优化设计过程通过编写仿真程序来实现,得到优化的设计尺寸后,对并联机构进行三维造型,最后导入到 ADAMS 分析软件中进行仿真分析,输出仿真结果。

2 马鞍型并联跟踪台

如图 1 所示,马鞍型并联跟踪台是一种带约束分支的并联机构,由动平台、定平台、1 个约束分支和 4 个驱动杆组成。动平台通过 4 个结构完全相同的驱动杆与定平台连接,驱动杆上端 4 个球铰链中心点和下端 4 个球铰链中心点呈矩形分

布,驱动杆通过直线电机驱动其伸长和缩短;约束分支位于动平台和定平台几何中心位置,由精密可伸缩万向铰链构成。由于整体支撑布局形式呈“马鞍型”,所以称该跟踪台为马鞍型并联跟踪台。

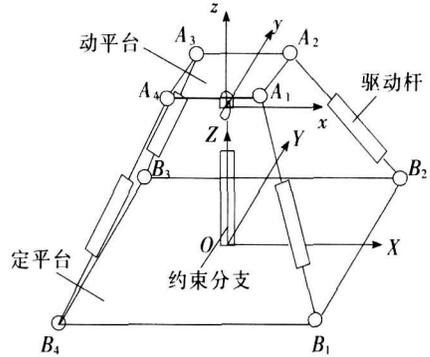


图 1 马鞍型并联跟踪台结构图

Fig. 1 Structure of saddle-shaped parallel tracking platform

马鞍型并联跟踪台主要有 3 个特点:(1)各驱动杆呈马鞍型并联支撑,承载力大、稳定性好;(2)各驱动杆均采用直线电机直接驱动,伸缩速度快,传动效率高;(3)约束分支由精密可伸缩万向铰链构成,其伸缩部分采用具有花键配合的导向结构,既能起到动平台升降导向作用,又能解决机构整体防转问题。

该并联机构由 11 个构件组成,连接这 11 个构件共有 14 个运动副,其中包括 8 个球铰, 5 个移动副, 1 个万向节,所有运动副自由度总和为 31。机构存在 4 个冗余自由度,即驱动杆的自转对整个机构的运动无影响。根据 Kutzbach Grubler 公式^[3],自由度计算为:

$$M = 6(n - g - 1) + \sum_{i=1}^g f_i - F_0, \quad (1)$$

式中, n 为机构总构件数; g 为机构运动副数; f_i 为运动副自由度总和; F_0 为冗余自由度。

经计算,该并联机构自由度 $M = 3$,因此,该并联机构能够实现空间的三自由度运动,包括:(1)升降运动-动平台沿 Z 轴做升降运动;(2)俯仰运动-动平台绕 y 轴旋转;(3)偏摆运动-动平台绕 x 轴旋转;(4)上述三种运动的合成。

3 仿真程序

3.1 设计思想

仿真程序的设计是将 Matlab 软件的可视化

仿真建模功能与机构的参数化设计原理结合起来,对并联机构参数化设计过程进行可视化动态仿真,实现并联机构的优化设计。

3.2 运动学模型^[3-6]

以约束分支万向铰链十字轴轴心为原点建立动平台坐标系 $oxyz$, 以定平台几何中心点为原点建立定平台坐标系 $OXYZ$, 两坐标系坐标轴同向且平行, 如图 1 所示。动平台和定平台为长方形, 设动平台边长为 a, b , 定平台边长为 c, d , 万向铰链十字轴轴心到动平台距离为 h , 动平台各铰点坐标向量用 $A(i=1, 2, 3, 4)$ 表示, 定平台各铰点坐标向量用 $B(i=1, 2, 3, 4)$, 则动平台和定平台

$$R = \begin{bmatrix} c(\phi)c(\theta) & c(\phi)s(\theta)s(\phi) - s(\phi)c(\phi) & s(\phi)s(\phi) + c(\phi)s(\theta)c(\phi) \\ s(\phi)c(\theta) & c(\phi)c(\phi) + s(\phi)s(\theta)c(\phi) & s(\phi)s(\theta)s(\phi) - c(\phi)s(\phi) \\ -s(\theta) & c(\theta)s(\phi) & c(\theta)c(\phi) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中, $s = \sin, c = \cos$, 则动平台各铰点在定平台坐标系的位置向量为 $P + R \cdot A_i$, 求得各驱动杆杆长向量为:

$$A_i B_i = P + R \cdot A_i - B_i \quad (5)$$

根据得到的杆长向量 $A_i B_i$, 在空间直角坐标系下解算, 可以得到动平台处于不同位置和姿态下各驱动杆的杆长值和摆角值。

3.3 参数化设计流程

依据建立的跟踪台运动学模型, 采用模块化程序设计方法, 将仿真程序框架划分成 4 个模块, 分别为: 尺寸设定模块、姿态调整模块、运动显示模块和数据输出模块。各模块的功能如下:

- (1) 尺寸设定模块: 进行并联机构初始尺寸的设定, 包括动平台尺寸、定平台尺寸, 动平台和定平台之间的距离设定等;
- (2) 姿态调整模块: 进行并联机构动平台位置向量和姿态向量的设定和动态调整;
- (3) 运动显示模块: 在图形窗口内, 实时显示

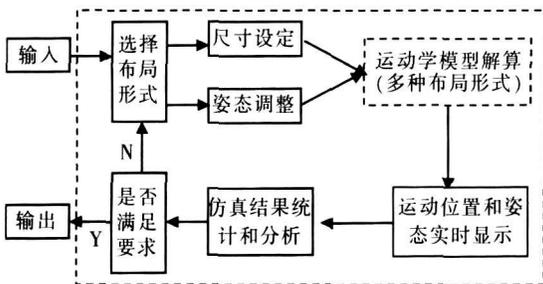


图 2 参数化设计流程图

Fig. 2 Flowchart of parameterization design

各铰点在各自坐标系的位置向量可表示为:

$$A_1 = \left[-\frac{a}{2} \quad -\frac{b}{2} \quad h \right]^T \quad B_1 = \left[-\frac{c}{2} \quad -\frac{d}{2} \quad 0 \right]^T$$

$$A_2 = \left[\frac{a}{2} \quad -\frac{b}{2} \quad h \right]^T \quad B_2 = \left[\frac{c}{2} \quad -\frac{d}{2} \quad 0 \right]^T$$

$$A_3 = \left[\frac{a}{2} \quad \frac{b}{2} \quad h \right]^T \quad B_3 = \left[\frac{c}{2} \quad \frac{d}{2} \quad 0 \right]^T$$

$$A_4 = \left[-\frac{a}{2} \quad \frac{b}{2} \quad h \right]^T \quad B_4 = \left[-\frac{c}{2} \quad \frac{d}{2} \quad 0 \right]^T$$

令 $P = [P_x \ P_y \ P_z]^T$ 为动平台位置向量, $\eta = [\varphi \ \theta \ \phi]^T$ 为动平台姿态向量, (其中, φ 为滚转角, θ 为俯仰角, ϕ 为偏摆角), 则动平台坐标系到定平台坐标系的姿态变换矩阵为:

并联机构的运动状态;

(4) 数据输出模块: 对解算得到的驱动杆杆长值和摆角值进行统计和实时显示。整个参数化设计流程如图 2 所示。

3.4 仿真程序实现

仿真程序包括主程序和子程序两部分。主程序负责并联机构位置和姿态初始化和对子程序的调用; 子程序中存储运动学模型解算函数, 是主程序函数调用的响应。仿真过程通过主程序对子程序的调用来实现并联机构驱动杆杆长和摆角的实时解算和统计。其中主程序的初始化是将初始位置和姿态信息嵌入到 `OpeningFcn()` 函数内部, 进行位置和姿态初始化工作, 格式为:

```

function OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
{
% 视图窗口中三维坐标系的建立
% 初始位置和姿态信息设定
.....
}
  
```

子程序是利用并联机构运动学模型解算函数 `dt emluator(Px, Py, Pz, φ, θ, φ)` 来实现的, 该函数能够实时获取动平台位置和姿态信息, 即位置向量 $P = [P_x \ P_y \ P_z]^T$ 和姿态向量 $\eta = [\varphi \ \theta \ \phi]^T$ 的值, 根据这两个向量的值, 实时解算出各驱动杆杆长数据和摆角数据, 该数据一路传给 EDIT 变量用于数据显示, 另一路传给图形窗口用于运动状态的实时更新。其中, 数据与可视化图形

之间的数据交换是通过 handle 句柄按址传递来实现的。图 3 为并联机构参数化仿真主界面。

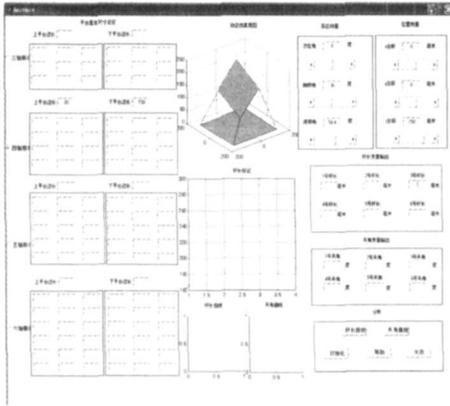


图 3 参数化仿真主界面

Fig. 3 Main interface of parameterization simulation

3.5 仿真结果

经仿真,得到的跟踪台优化设计尺寸为:动平台尺寸 $a=100\text{ mm}$, $b=80\text{ mm}$;定平台尺寸 $c=260\text{ mm}$, $d=200\text{ mm}$;动平台和定平台之间的距离为 229 mm ,万向铰链十字轴轴心到动平台距离 $h=24\text{ mm}$;驱动杆最大伸长量为 70 mm ,最大缩短量为 40 mm ,总行程为 110 mm ,驱动杆最大摆角为 12° 。根据以上参数,使用 Solidworks 软件分别对动平台、定平台、约束分支和驱动杆进行三维造型并进行装配,装配后的跟踪台三维模型如图 4 所示。

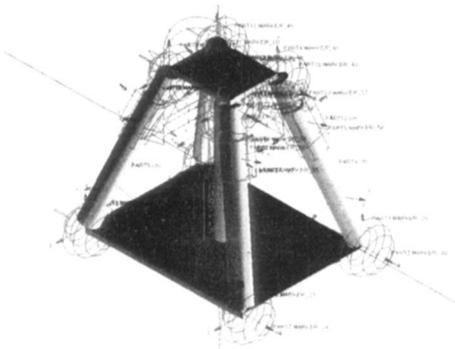


图 4 马鞍型并联跟踪台三维模型图

Fig. 4 3D model of saddle-shaped parallel tracking platform

4 仿真分析

将跟踪台三维模型保存为 Parasolid 文件格

式,导入 ADAMS/View 分析环境下,在该环境下对构建的跟踪台三维模型进行运动性能仿真和分析,仿真分析流程^[7]如图 5 所示。

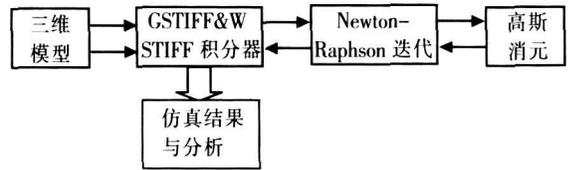


图 5 仿真分析流程图

Fig. 5 Flowchart of simulation analysis

4.1 自由度校验

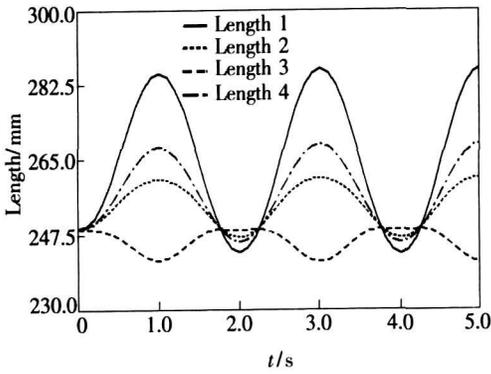
如图 4 所示,在三维模型各构件之间创建约束关系。在每个驱动杆两端添加球铰链约束;驱动杆伸缩处添加移动副约束;约束分支处添加移动副和万向铰链组合约束,且万向铰链约束的十字轴方向设定与动平台坐标系 x 轴和 y 轴方向同向平行;为定平台添加固定副约束。约束关系创建完成后,利用 ADAMS 中校验功能 (Model Verify) 对该机构进行自检校验,校验结果显示:该机构共有 11 个构件,3 个自由度,不存在隐含的错误,说明马鞍型并联跟踪台的机构设计合理。

4.2 干涉和超定位检验

检验过程:首先为三维模型的动平台创建驱动,使动平台按照某一运动轨迹运动,然后利用对象测量功能 (Measure) 对 4 个驱动杆的杆长变化和摆角变化进行测量,检验是否有运动干涉和超定位问题的存在。仿真分析设定的动平台运动轨迹为升降运动、俯仰运动和偏摆运动三者的合成运动,运动的参数设定为:升降运动 30 mm 、俯仰运动 30° 、偏摆运动 30° ,运动激励位置添加在跟踪台约束分支万向铰链十字轴轴心处,包括 1 个升降运动激励 Z 和 2 个旋转运动激励 R_x 和 R_y ,对应的运动方程^[8]建立为:

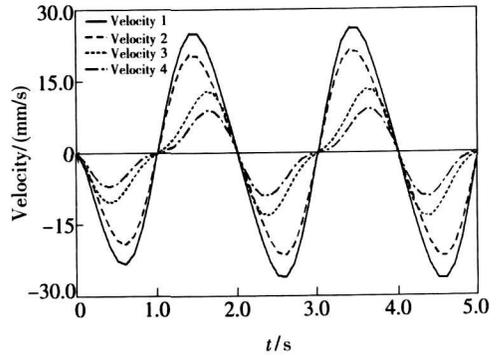
$$\begin{cases} Z = -500 \times t / (10 \times t + 1) \times \sin(\pi \times t) \\ R_x = 8.5 \times t / (10 \times t + 1) \times \sin(\pi \times t) \\ R_y = 8.5 \times t / (10 \times t + 1) \times \sin(\pi \times t) \end{cases} \quad (6)$$

运动方程建立后,通过设定仿真时间和仿真步长对并联机构进行运动仿真分析。图 6(a)和图 6(b)是在设定仿真时间为 5 s 和仿真步长为 50 step 的条件下得到的驱动杆杆长和摆角变化曲线。



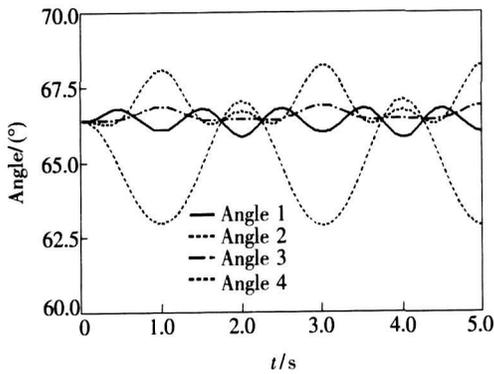
(a) 杆长变化曲线

(a) Variety plots of drive rod lengths



(a) 驱动杆速度变化曲线

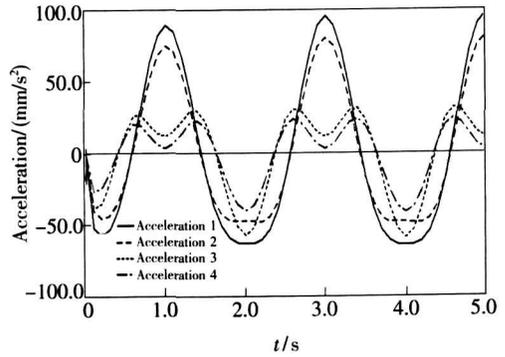
(a) Variety plots of drive rod velocities



(b) 摆角变化曲线

图 6 驱动杆杆长和摆角变化曲线

Fig. 6 Varieties of drive rod lengths and tilting angles



(b) 驱动杆加速度变化曲线

(b) Variety plot of the drive rod acceleration

图 7 驱动杆驱动速度和加速度变化曲线

Fig. 7 Variety plot of the drive rod velocity and acceleration

从图 6(a) 驱动杆杆长变化曲线来看, 在上述给定运动方程条件下, 其杆长变化在 0~ 43.2 mm 范围内, 从图 6(b) 驱动杆摆角变化曲线来看, 其摆角的变化在 0~ 4.2° 之间, 与上述 Matlab 对应仿真数据进行对比, 驱动杆的杆长变化和摆角变化均没有超出允许的范围, 且各驱动杆杆长和摆角曲线均呈连续性和周期性规律变化, 无跳变或中断等异常情况出现, 说明该并联跟踪台机构在运动过程中没有发生干涉现象, 也不存在超定位问题。

同样, 在设定仿真时间 5 s 和仿真步长 50 step 条件下, 对各驱动杆的速度和加速度进行测量, 得到的驱动杆速度和加速度变化曲线如图 7(a) 和 7(b) 所示。其中, 速度曲线表明了驱动杆伸缩的快慢程度, 加速度曲线表明了速度变化的快慢程度。对并联机构进行运动控制时, 要求各驱动杆之间相互协同、同步运动。从图 7(a) 驱动杆速度变化曲线来看, 4 个驱动杆的速度按周期性变化, 而且变化的

周期均相同, 都为 2 s, 说明各驱动杆的运动满足同步的要求。其中, 驱动杆的速度最大值为 26.2 mm/s, 加速度最大值为 97.2 mm/s², 这 2 个值是进行驱动直线电机和运动控制卡选型的重要依据。

5 实验验证

以上述优化设计尺寸和仿真结果为依据, 综合力学性能要求, 研制出马鞍型并联跟踪台实验样机, 实验样机照片如图 8 所示。

实验是分成 2 个步骤并分层次进行。第一步是控制并联跟踪台动平台按设定的轨迹进行周期性往复运动, 检验按照该仿真设计方法设计的机构是否存在干涉和超定位问题, 同步性是否良好; 第一步通过后, 再利用 VC++ 语言编写数据监测模块程序, 对各驱动杆的速度进行实时监测和记录, 并将监测和记录得到的数据统计后生成曲线,



图 8 实验样机

Fig. 8 Experiment prototype

通过与对应仿真曲线进行对比来验证仿真结果的正确性。

实验采用螺杆长 135 mm, 导程 3.175 mm 的驱动直线电机; 采用了 32 位 PCI 总线, 两个加/减计数器, 最大插补速度为 1 MHz, 脉冲输出频率误差 $< 0.1\%$ 的四轴运动控制卡。马鞍型并联跟踪台各驱动杆的同步运动控制通过插补运动^[9]方式来实现。控制平台按升降运动、俯仰运动和偏摆运动三者的合成运动轨迹进行往复运动, 运动的参数同样设定为: 升降运动 30 mm、俯仰运动 30° 、偏摆运动 30° , 动平台运动周期的设定与驱动杆速度周期一致, 为 2 s。经观察, 运动过程中并没有干涉和超定位问题的出现, 而且运动的同步性也没有被破坏。利用数据监测模块实时监测和记录脉冲输出频率, 并按式(7)将脉冲输出频率换算成驱动杆的速度:

$$v = \frac{L}{200 \times M} \times \nu_p, \quad (7)$$

式中, v 表示驱动杆的速度, ν_p 表示脉冲输出频率, L 表示直线电机螺杆导程, M 表示驱动细分步数。

对得到的驱动杆速度数据进行统计并生成变化曲线, 以行程最长的驱动杆为例, 在 2 s 时间内, 在预先设定的梯形加速度变化规律条件下, 监测到的驱动杆速度变化曲线与上述仿真得到的驱动杆速度变化曲线对比如图 9 所示。

从图 9 来看, 监测得到的驱动杆速度曲线遵循 S 型曲线加减速规律变化: 即当驱动杆开始加速时, 其加速度以指定的变化率从 0 mm/s^2 线性增加至设定值 -97.2 mm/s^2 (其中, 设定驱动杆伸长方向为负方向), 对应的速度曲线为抛物线;

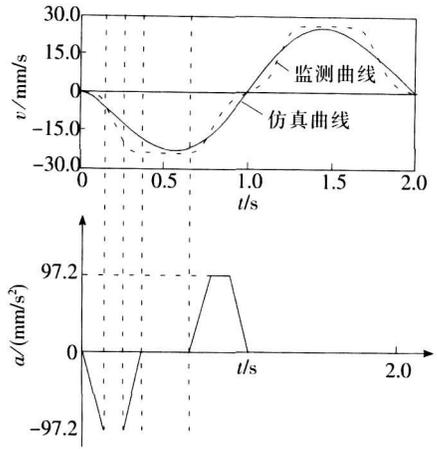


图 9 监测曲线与仿真曲线的对比

Fig. 9 Contrast of monitor curve and simulation curve

当加速度达到设定值 -97.2 mm/s^2 并保持一段时间后, 对应的速度曲线为斜线; 当加速度减小时, 对应的速度曲线为抛物线; 当驱动杆的加速度经过增大、保持和减小 3 个阶段以后, 对应的驱动杆速度达到最大值, 定义该值为实际驱动速度值。从监测速度曲线与仿真速度曲线对比来看, 监测速度曲线是围绕着仿真速度曲线在变化, 虽然两者经历的加速和减速的过程不同, 但是其运动的初始状态、结束状态和运动周期是完全相同的, 说明两者达到的运动效果完全一致, 验证了仿真结果的正确性。研究表明, 存在监测驱动速度最大值与对应仿真速度最大值之间偏差的原因之一是由于采用仿真加速度最大值 $\pm 97.2 \text{ mm/s}^2$ 作为实际加速度的设定值; 另一个重要原因是由于控制卡本身采用插补运动控制策略来协调各驱动杆的同步运动, 插补算法精度的高低对驱动速度精度会造成一定的影响。

6 结 论

介绍了通过编写 Matlab 仿真程序与 ADAMS 仿真分析相结合的仿真设计方法, 利用该方法研究了马鞍型并联跟踪台的优化设计和运动学特性问题, 依据得到的仿真结果, 完成了马鞍型并联跟踪台实验样机的研制。通过对仿真结果的验证表明, 马鞍型并联跟踪台具备较好的运动同步性, 不存在运动干涉和超定位问题, 仿真结果正确有效。该仿真设计方法能够使并联机构的设计周

期缩短近一半, 而且 Matlab 仿真程序采用模块化程序设计, 不但可以实现多种支撑布局形式并联机构的运动仿真, 还可以方便地进行二次开发。

仿真设计方法的实现, 对并联机床、并联机器人和并联跟踪系统的快速设计具有理论和应用意义。

参考文献:

- [1] 宋增来, 陈振华. N 自由度机器人仿真的实现[J]. 计算机工程与设计, 2006, 27(24): 4813-4816.
SONG Z L, CHEN ZH H. Simulation of N-Dof robot[J]. *Computer Engineering Design*, 2006, 27(24): 4813-4816. (in Chinese)
- [2] 李坤, 杨家军. 5 自由度焊接机械手的运动学研究[J]. 机器人技术, 2007(4): 20-22.
LI K, YANG J J. Investigation on Kinematics 5-DOF Welding Manipulator[J]. *Robot Technology*, 2007(4): 20-22. (in Chinese)
- [3] 黄真, 孔令富, 方跃法. 并联机器人机构学理论及控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
HUNG ZH, KONG L F, FANG Y F. *The theory and control of the Mechanisms of Parallel Robots*[M]. Beijing: China Machine Press, 1997. (in Chinese)
- [4] 王乐锋, 荣伟彬, 孙立宁. 三支链六自由度并联柔性铰微动机器人的研究[J]. 光学精密工程, 2007, 15(4): 529-534.
WANG L F, RONG W B, SUN L N. Research on a three link six-DOF micromanipulator with flexure hinges[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(4): 529-534. (in Chinese)
- [5] 刘晶红, 孙辉, 张葆, 等. 航空光电成像平台的目标自主定位[J]. 光学精密工程, 2007, 15(8): 1305-1310.
LIU J H, SUN H, ZHANG B, et al.. Target self-determination orientation based on aerial photoelectric imaging platform[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(8): 1305-1310. (in Chinese)
- [6] NICOLAE L, EPHRAHIM G. Analytical model of displacement amplification and stiffness optimization for a class of flexure based compliant mechanisms[J]. *Computers and Structures*, 2003, 81(3): 2797-2810.
- [7] 胡明, 邓宗全, 高海波, 等. 基于 ADAMS 的六轮月球车动力学建模与仿真[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(1): 28-32.
HU M, DENG Z Q, GAO H B, et al.. Dynamic modeling and simulation analysis based ADAMS of the six-wheeled lunar rover[J]. *J. Harbin Institute of Technology*, 2007, 39(1): 28-32. (in Chinese)
- [8] 刘得军, 陈晓晖, 王世营, 等. ADAMS 环境下并联坐标测量机运动分析与仿真[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2007, 11: 18-21.
LIU D J, CHEN X H, WANG SH Y, et al.. Kinematic analysis and simulation for a parallel link coordinate measuring machine based on ADAMS environment[J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2007, 11: 18-21. (in Chinese)
- [9] 楚中毅, 崔晶, 孙立宁, 等. 双重驱动 2-DOF 平面并联机器人系统的研究[J]. 光学精密工程, 2006, 14(3): 456-461.
CHU ZH Y, CUI J, SUN L N, et al.. Research of a novel dual-driven 2-DOF planar parallel robot[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3): 456-461. (in Chinese)

作者简介: 刘峰(1978-), 男, 辽宁辽阳人, 工学博士, 主要研究方向为高速、精密并联运动跟踪技术。E-mail: tjuliufeng@tju.edu.cn

导师简介: 王向军(1955-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 工学博士, 教授, 博导, 主要研究领域为计算机视觉、影像测量技术和微光机电系统。E-mail: xdocuxjw@vip.163.com