

# Stewart 平台的 SimMechanics 仿真

须颖<sup>1</sup>,徐福红<sup>2</sup>,邵萌<sup>1</sup>

(1. 沈阳建筑大学微纳检测与运动控制实验室,辽宁 沈阳 110168;

2. 沈阳建筑大学机械工程学院,辽宁 沈阳 110168)

**摘要** 目的 为更方便地建立模型进行仿真,避免不同软件之间的兼容问题,提高仿真的效率,研究 Stewart 平台的 SimMechanics 仿真. 方法 基于 Matlab 自身进行联合仿真,使用 Matlab 里的 SimMechanics 工具箱建立 Stewart 平台,该平台包括支腿轨迹产生器,执行机构,比例-积分-微分(PID)控制器和输出显示器. 通过分析该 Stewart 仿真模型得到其运动特性,测试不同比例系数( $K_p$ )值对 PID 控制器的影响. 结果 由示波器观察得到的支腿的伸缩长度与设定支腿的伸缩长度一致,证明该仿真可靠. 对比3组仿真结果,验证了  $K_p$  值对 PID 控制器的影响是正确的. 同时该仿真方法还可以得到上平台重心的运动轨迹. 结论 Stewart 平台的 SimMechanics 仿真方法提高了仿真效率,同时  $K_p$  参数的选值对实际应用有很大的指导意义,充分体现了仿真的作用.

**关键词** Matlab;六自由度;SimMechanics;PID 控制器

中图分类号 TH113.2 文献标志码 A

## SimMechanics Simulation of Stewart Platform

XU Ying<sup>1</sup>, XU Fuhong<sup>2</sup>, SHAO Meng<sup>1</sup>

(1. Laboratory of Micro Nano Testing and Motion Control, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168;

2. School of Mechanical Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

**Abstract:** In order to set up the model more conveniently, simulation is carried out to avoid the compatibility between different software and improve the efficiency of simulation, the SimMechanics simulation of Stewart platform is studied. Joint simulation based on Matlab itself, using the SimMechanics toolbox in Matlab to build the Stewart platform. The platform comprises a leg track generator, an actuator, a proportional integral derivative (PID) controller and an output display. By analyzing this Stewart simulation model, its motion characteristics are obtained and the influence of different Proportionality coefficient ( $K_p$ ) values on the PID controller is tested. The telescopic length of the supporting leg observed by the oscillography is consistent with the telescopic length of the setting leg, which proves that the simulation is reliable. By comparing the simulation results

收稿日期:2017-04-25

基金项目:国家十二五科技支撑计划项目(2011BAK15B09)

作者简介:须颖(1959—),男,教授,博士,主要从事超精密运动控制技术方面研究.

of the 3 groups, it is proved that the influence of  $K_p$  value on the PID controller is correct. The simulation method can also obtain the trajectory of the center of gravity of the upper platform. The simulation method improves the efficiency of simulation, meanwhile, the selection of the  $K_p$  parameters has a great guiding significance for practical applications, and fully reflects the role of simulation.

**Key words:** Matlab; six DOF; SimMechanics; PID controller

Stewart 并联六自由度平台始于 1965 年德国学者 Stewart 发明的飞行模拟器,该平台具有很好的刚度,较高的精度,良好的动态性能,所以广泛应用于精密控制、航空航天、制造装配以及震动平台隔离等领域<sup>[1-2]</sup>. 目前常用仿真软件有 ADAMS, ANSYS, 或者是它们之间的联合仿真<sup>[3-6]</sup>但是不同软件的联合仿真要涉及接口连接问题,不太利于仿真,操作过程比较复杂. Matlab 里自带 Simulink 和 SimMechanics 工具箱<sup>[7-9]</sup>,可以通过这几个工具箱快速的建立模型,为机械系统以及控制系统提供比较直观的运动学分析以及动力学分析手段<sup>[10]</sup>. SimMechanics 方便建模,但是也有其局限性,对于很复杂的模型建模工作量大,计算转动惯量等数据比较繁琐,容易出错误,运用三维 CAD 软件可以很好地辅助建模并计算模型的参数. 目前对于 Matlab 里的 SimMechanics 与常用 CAD 软件的接口问题已经有学者<sup>[11]</sup>提出了如何在这两个软件之间建立接口,并将需要的模型导入 Matlab 自动生成 SimMechanics 模型的操作方法. 由于 Stewart 模型的铰链比较多,导入 Matlab 时模型容易生成乱码,所以笔者基于 Matlab 本身联合仿真,避免不同软件之间的兼容问题,直接对模型进行建模,提高了仿真的效率,为其他仿真提供了更多的选择.

# 1 Simulink 结合 SimMechanics 进行 Stewart 平台建模

## 1.1 Stewart 平台的结构分析

Stewart 平台是由下平台的 6 个铰链连接下支腿,上平台通过万向铰连接上支腿,上下支腿通过柱面铰连接<sup>[12]</sup>而成. 该平台的结

构如图 1 所示.  $A_1 \sim A_6$  表示上平台的 6 个铰点,  $B_1 \sim B_6$  表示下平台的 6 个铰点. 从图 1 可知调整支腿的长度可以实现平台的运动,平台由万向铰连接而成,能够实现上平台沿 6 个方向自由移动,通过仿真平台的运动,观察平台的理想运动范围. 上下平台的高度为  $H=0.2\text{ m}$ ,其中上平台的直径  $D=0.241\text{ m}$ ,厚度  $h=0.005\text{ m}$ ,质量  $m=0.42\text{ kg}$ ;下平台的直径  $D=0.241\text{ m}$ ,厚度  $h=0.01\text{ m}$ ,质量  $m=1.81\text{ kg}$ .

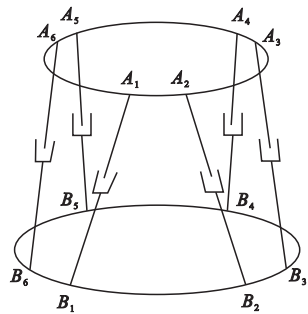


图 1 Stewart 平台简图

Fig. 1 Stewart platform diagram

## 1.2 Stewart 平台建模

在 Simulink 的 Simscape 模块中联合 SimMechanics 对 Stewart 平台建模,通过刚体与铰链之间相互连接搭建模型. 首先建立上平台,在刚体子模块组里找到刚体模块 (body) 建立上平台修改刚体名称为 Top,调整好模块的大小,并修改上平台模块,设置坐标 (CS) 的个数为 6 个,CS 坐标就是刚体与铰链连接的位置坐标. 设置上平台的转动惯量,质量以及重心坐标 (CG),上平台的 6 个坐标位置分别连接 6 个万向铰链. 下平台 Base 的操作与上平台一致,6 个位置坐标 (CG) 也分别连接好 6 个万向铰,并设定平台的质量、转动惯量以及重心坐标 (CG). 每个

支腿是通过刚体 - 柱面铰 - 刚体连接而成, 通过铰链组的柱面铰连接好上下两个支腿 (用两个刚体模块表示). 在仿真过程中要用光栅尺测量支腿的伸缩长度, 同时控制器也会给每个支腿施加作用力用来调整支腿长

度, 则需要在柱面铰这里添加 3 个传感器, 第 1 个传感器用来施加作用力  $F_{xorce}$ , 第 2 个传感器用来反馈支腿的位移  $Pos$ , 第 3 个传感器用来反馈支腿的移动速度  $Vel$ , 建立单个支腿模型如图 2 所示.

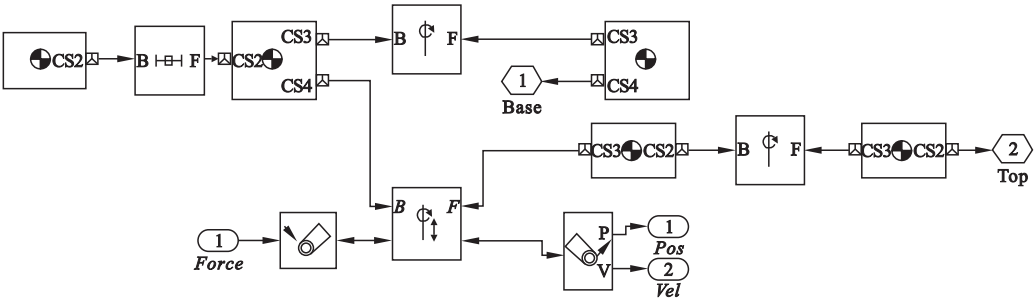


图 2 支腿的建模

Fig. 2 Leg modeling

先建模一个支腿后创建子系统, 然后再建立另外 5 个支腿, 修改每个支腿的参数. 把创

建的 6 个支腿和上下两个平台用万向铰连接起来, 完整的 Stewart 平台模型如图 3 所示.

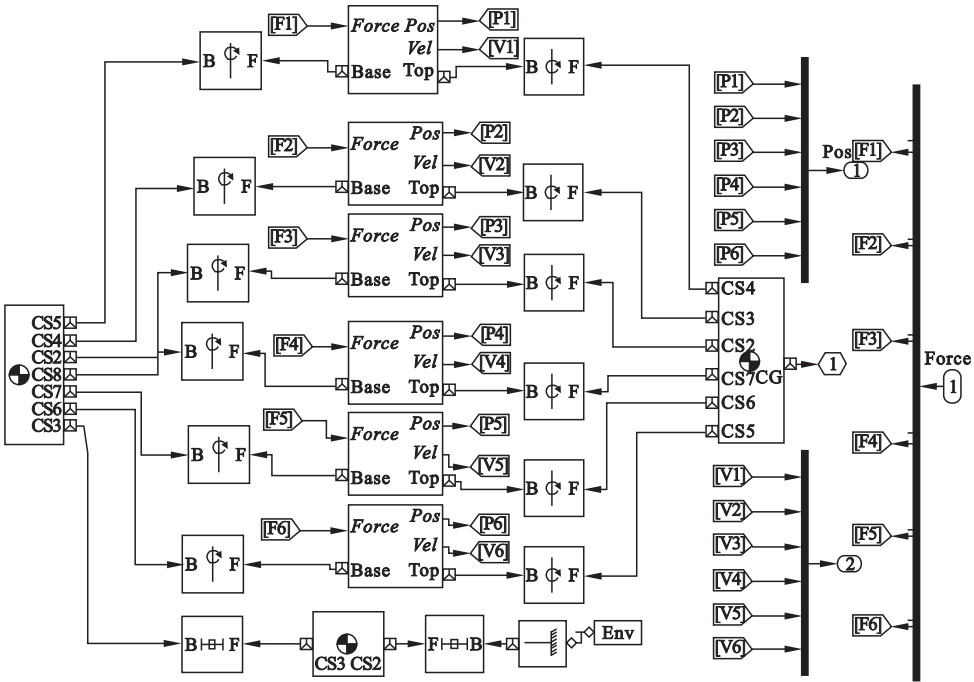


图 3 建模完成后的 Stewart 平台

Fig. 3 The Stewart platform after modeling

2 运动学反解

比例 - 积分 - 微分 (PID) 控制器需要用运动学反解, 即通过调整误差来达到无误差控制, 利用反解来求支腿的伸缩长度. 并联机

构的反解, 即已知平台的各个位置坐标, 反过来求支腿的长度, 把支腿的长度作为 PID 控制器的输入量, 建立两个坐标系, 以上平台中心建立一个动坐标系, 下平台的中心作为静坐标系通过欧拉变换来求解支腿长度<sup>[13]</sup>.

2.1 运动学反解的计算

该平台具体算法如下:以下平台中心为基准建立静坐标系  $A$ , 以上平台中心为基准建立动坐标  $B$ , 计算过程中会涉及坐标系的换算. 笔者设动坐标系  $B$  的原点在  $A$  下的坐标为  $P1(x1,x2,x3)$ , 支腿的一端  $A_1$  在  $A$  上且坐标为  $P2(x4,x5,x6)$ , 支腿的另一端  $B_1$  在  $B$  上且坐标为  $P3(x7,x8,x9)$ ,  $B$  相对于  $x$  轴的旋转矩阵为  $R1$ , 相对于  $y$  轴旋转矩阵为  $R2$ , 相对于  $z$  轴的旋转矩阵为  $R3$ , 则动坐标系  $B$  相对于静坐标系  $A$  的旋转矩阵<sup>[14]</sup> 为  $R$ ,  $a, b, y$  分别为  $x$  轴,  $y$  轴,  $z$  轴的旋转角.

$$R1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(a) & -\sin(a) \\ 0 & \sin(a) & \cos(a) \end{bmatrix}, \tag{1}$$

$$R2 = \begin{bmatrix} \cos(b) & 0 & \sin(b) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(b) & 0 & \cos(b) \end{bmatrix}, \tag{2}$$

$$R3 = \begin{bmatrix} \cos(y) & -\sin(y) & 0 \\ \sin(y) & \cos(y) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \tag{3}$$

$$R = R1 \times R2 \times R3. \tag{4}$$

根据空间向量的计算方法得:

$$OB + BB_1 = OA_1 + A_1B_1. \tag{5}$$

经变换则得:

$$A_1B_1 = OB + BB_1 - OA_1. \tag{6}$$

每个杆的长度  $leg$  为

$$leg = A_1B_1 = \sqrt{RP_1 + P_3 - P_2}. \tag{7}$$

因此每个杆的伸缩长度  $le$  为

$$le = leg - le0. \tag{8}$$

式中:  $le0$  为杆的初始长度.

2.2 支腿变化长度的编程

Simulink 里面预留了自定义模块, 可以根据需要来创建模块, 在自定义模块选择 Matlab Function 模块, 编写程序.  $m$  文件的书写十分灵活, 既可用 C 语言编写, 也可用自带的  $m$  语言编写, 由于  $m$  语言编写比较方便, 笔者用  $m$  语言编写反解的  $m$  文件, 自定义函数名和变量, 写入反解程序的  $m$  文件.

```
function le = fanjie ( a, by, x1, x2, x3, x4,
x5, x6, x7, x8, x9, le0)
R1 = [ 1 0 0; 0 cos(a) - sin(a); 0sin(a)
cos(a) ];
R2 = [ cos(b) 0 sin(b); 0 1 0; - sin(b) 0
sin(b) ];
R3 = [ cos(y) - sin(y) 0; sin(y) cos
(y) 0; 0 0 1 ];
R = R1 * R2 * R3
L = R * [ x1; x2; x3 ] + [ x7; x8; x9 ] -
[ x4; x5; x6 ]
L1 = L' * L;
le = sqrt(L1) - le0
```

对完成的  $m$  文件进行封装, 以便再次调用, 选择 Creat Mask 命令, 在参数选项里添加自变量, 自变量的名称和  $m$  文件的名称要保持一致. 调用封装好的反解模块, 建立 6 个支腿求解的模块,  $le1 \sim le6$  表示 6 个支腿的伸缩长度如图 4 所示.

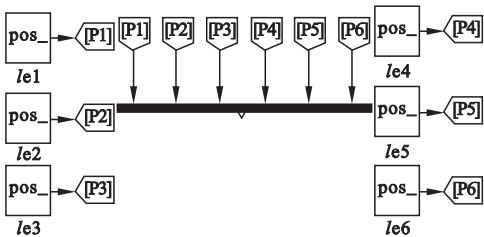


图 4 6 个支腿反解模块

Fig. 4 Six leg inverse module

将图 4 的程序创建子系统 Subsystem (见 图 5),  $pos_$  是支腿的目标长度, 作为 PID 控制器的输入值.

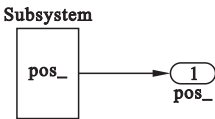


图 5 创建好的子系统

Fig. 5 A created completed subsystem

3 PID 控制器建模

PID 控制是模拟控制系统中最常用的控制方法, PID 控制器最重要的部分就是对参

数的整定,通过仿真来测试控制器在不同参数情况下该平台响应的快慢和稳定性,通过测试仿真的结果为实际控制器参数的设定起到指导参考的重要作用<sup>[15-18]</sup>.笔者测试几组不同比例系数的  $K_p$  值,通过观察仿真结果,来验证不同  $K_p$  值对 PID 控制器的影响.

建立 PID 控制器的模型.在 Simulink 里选择输入输出端口模块,增益模块,积分模块,根据 PID 控制的原理,通过调整理想驱动长度  $r\_pos$  和实际驱动长度  $pos$  的差值,以减少和消除误差的原理连接好各个模块, PID 模型控制器如图 6 所示.

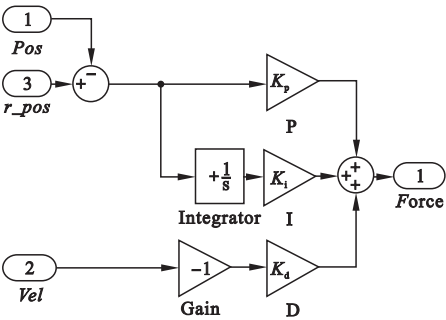


图 6 PID 控制器模型

Fig. 6 A model of PID control

4 Stewart 平台控制及仿真

4.1 完整控制系统的搭建

平台 Subsystem 模块里的  $Pos$  值和  $Vel$  值反馈给控制器 Subsystem2,控制器输出力  $Force$  给平台 Subsystem,在 Subsystem 外面接一个位置传感器,目的是观察平台重心的位置变化.最后加一个示波器,修改示波器参数,在里面把接口的数目设置成 4 个,分别连接支腿的伸缩量  $Pos$ 、运动速度  $Vel$ 、控制器的力  $Force$  和刚体重心位置传感器.示波器用来显示驱动力  $Force$  的输出情况、支腿速度和支腿差值的变化情况以及平台重心的运动情况,将模块都连起来即建立完整的闭环控制系统,完整的的系统的如图 7 所示.

模型建立后开始仿真实验,修改 Simu-

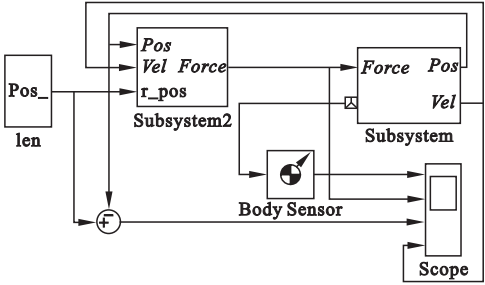


图 7 完整的控制系统

Fig. 7 A complete control system

link 的设置,在参数选项 SimMechanics 里设置运动仿真过程中显示运动模型.仿真运行时系统会自动弹出仿真的简化模型和运动状态,通过简图即可直观地看出平台的运动情况,便于理解仿真过程.在仿真过程中的运动状态三维简如图 8 所示.黑色小点代表了平台和支腿的重心位置,很直观的呈现了仿真的对象.

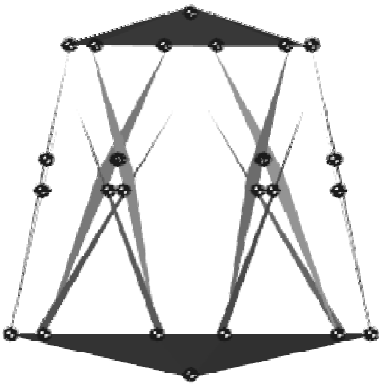


图 8 Stewart 平台三维运动图

Fig. 8 Stewart platform 3D motion diagram

4.2 设定 PID 控制器参数

笔者通过调整控制器  $K_p$  的参数,通过示波器观察支腿差值的变化,分析在不同  $K_p$  值的情况下支腿差值的变化情况,验证  $K_p$  值对 PID 控制器的影响.首先设定仿真的基本参数,仿真时间为 1s,其他选项默认.每个支腿变化长度如表 1 所示.

设定 3 组 PID 控制器的参数,比例系数  $K_p$ ,积分系数  $K_i$ ,微分系数  $K_d$ ,保持  $K_i, K_d$  不变,控制器参数如表 2 所示.



表 1 支腿变化长度

Table 1 Leg length change

支腿编号	变化长度/m
1	0.01
2	0.01
3	0.01
4	-0.01
5	-0.01
6	-0.01

表 2 PID 控制器参数

Table 2 PID controller parameters

组别	$K_p$	$K_i$	$K_d$
第 1 组	3 000	1 000	90
第 2 组	6 000	1 000	90
第 3 组	9 000	1 000	90

4.3 验证仿真的正确性

在 Matlab 工作空间对参数赋值:  $K_p = 3\,000$ ;  $K_i = 1\,000$ ;  $K_d = 90$ ; 运行 Simulink 模型,通过示波器分别观察支腿的运动速度,差值以及平台的位置和 PID 控制器驱动力的变化曲线. 首先验证仿真支腿运动轨迹的正确性,由示波器显示支腿伸缩长度的变化曲线如图 9 所示.

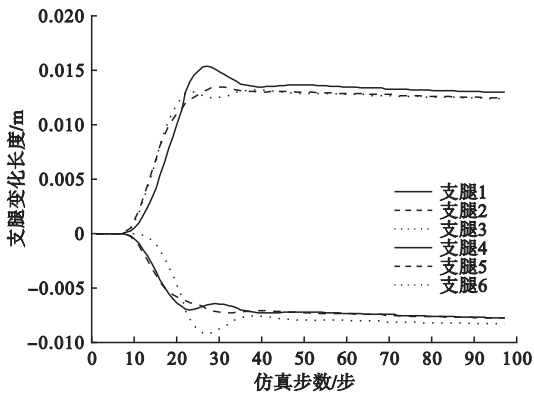


图 9 支腿的长度变化曲线

Fig. 9 Leg length change curve

由图 9 可知:支腿的运动长度由开始的 0 m 处逐步伸缩到 0.01 m 和 -0.01 m 处,与设定的支腿的伸缩长度相吻合,证明仿真可靠.同时通过该仿真还可以得到上平台重心

的运动轨迹(见图 10).

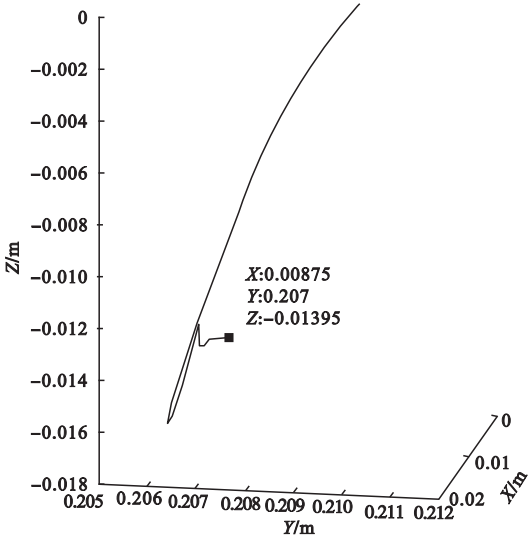


图 10 上平台重心运动轨迹

Fig. 10 Gravity trajectory of upper platform

4.4  $K_p$  参数的验证

测试不同  $K_p$  值对控制器的影响. 选取比较有代表性的支腿差值的变化曲线来比较不同  $K_p$  值下曲线的变化情况. 第 1 组  $K_p = 3\,000$ ,第 2 组  $K_p = 6\,000$ ,第 3 组  $K_p = 9\,000$ ,在 Matlab 里运行程序观察示波器,得到 3 组支腿的支腿伸缩长度变化曲线如图 11 所示.

参考文献[19-20]研究了  $K_p$  值对 PID 控制器的影响,  $K_p$  值越大时,系统的响应更快,可以减少稳态误差,提高控制的精度,但容易造成振荡次数增加,调节时间加长,使系统变得不稳定. 从图 11 可以看出,第 3 组的  $K_p$  值最大,系统的震荡明显比前两组明显,但是 0.3 s 以后系统后面的支腿的变化曲线密集,明显比前两组稳定的快,比较符合  $K_p$  值增加对 PID 影响的特征. 第 1 组  $K_p$  值最小,同时也只有一个波形曲线,即对系统的震荡比较小,但是明显看出 0.3 s 以后支腿长度变化曲线比较稀疏,说明支腿长度变化比较缓慢,达到稳定状态的时间比较长,同样符合  $K_p$  值对 PID 影响的特征. 笔者对  $K_p$  值的仿真结果也再次验证了其对 PID 控制器的影响,同时也明确了仿真的意义,通过仿真来适

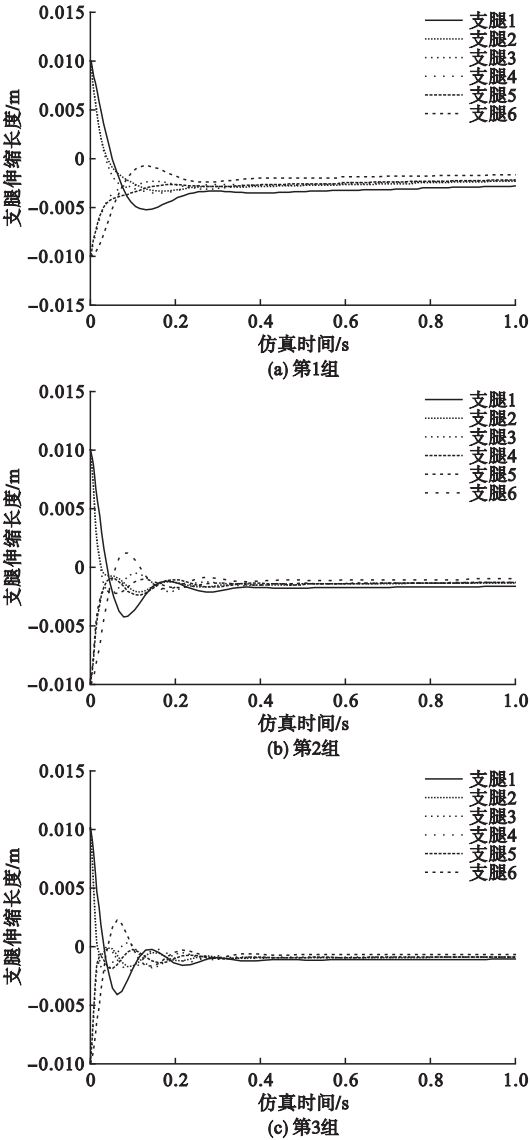


图 11 3 组支腿变化曲线

Fig. 11 Three leg length change curve

当调整产品的参数和性能,可以减少产品的开发成本和操作难度.

5 结 论

(1)基于 Matlab 本身的联合仿真,避免不同软件之间的兼容问题,直接对模型进行建模,提高了仿真的效率,为其他仿真提供了更多的选择.

(2)对不同  $K_p$  值进行实验,对比仿真结果,验证了  $K_p$  值对 PID 的影响,同时仿真的参数选择对实际应用有很大的指导意义,充

分体现了仿真的作用.

参考文献

[ 1 ] 贾雨璇,谢哲东. 并联机构的发展及应用领域的概述[J]. 农业与技术,2016,36(7):57-58.  
(JIA Yuxuan,XIE Zhedong. The development and application of parallel mechanism[J]. Agriculture and technology, 2016, 36(7): 57-58.)

[ 2 ] 刘志星,潘春萍,王宇,等. 联合仿真平台下飞行模拟器 Stewart 平台及其负载控制研究[J]. 机床与液压,2015,43(3):72-75.  
(LIU Zhixing,PAN Chunping,WANG Yu, et al. Study on control of flight simulator stewart platform and its load by joint simulation[J]. Machine tool & hydraulics, 2015, 43(3): 72-75.)

[ 3 ] 许宏光,谭健. 基于 ADAMS 和 Matlab/Simulink 的 6-UCU 型 Stewart 并联机构联合仿真[J]. 机床与液压,2016,44(11):32-36.  
(XU Hongguang,TAN Jian. Co-simulation for 6-UCU stewart parallel mechanism based on ADAMS and Matlab/Simulink [J]. Machine tool & hydraulics, 2016, 44(11): 32-36.)

[ 4 ] 林砺宗,潘大亨,傅招国,等. 基于 ADAMS 的六自由度液压动感平台建模及运动学仿真[J]. 机床与液压,2012,40(13):166-169.  
(LIN Lizong,PAN Daheng,FU Zhaoguo, et al. Modeling and kinematics simulation of 6-DOF hydraulic dynamic platform based on solidworks and ADAMS [J]. Machine tool & hydraulics, 2012, 40(13): 166-169.)

[ 5 ] 刘志星,潘春萍,赵玉龙,等. 基于 ADAMS 的六自由度飞行模拟器动力学仿真研究[J]. 组合机床与自动化加工技术,2013(11):14-16.  
(LIU Zhixing,PAN Chunping,ZHAO Yulong, et al. Study on flight simulator dynamics simulation based on ADAMS [J]. Modular machine tool & automatic manufacturing technique, 2013(11): 14-16.)

[ 6 ] 赵彦. 基于 ADAMS 和 MATLAB 的四足机器人联合仿真[D]. 济南:山东大学,2014.  
(ZHAO Yan. The simulation of quadruped robot based on MATLAB and ADAMS [D]. Jinan: Shandong University, 2014.)

[ 7 ] 刘颖超,李军,王维. 基于 SimMechanics 的气动 6 自由度并联机器人的研究[J]. 机床与液压,2013(24):62-66.  
(LIU Yingchao,LI Jun,WANG Wei. Research

- on pneumatically actuated 6-DOF parallel robot based on SimMechanics[J]. Machine tool & hydraulics, 2013(24): 62 - 66.
- [8] 康信勇, 赵翼翔, 陈新. 基于 SimMechanics 的六自由度机械臂仿真研究[J]. 机床与液压, 2016(23): 23 - 29.  
(KANG Xinyong, ZHAO Yixiang, CHEN Xin. Simulation research of 6-DOF robot arm based on SimMechanics[J]. Machine tool & hydraulics, 2016(23): 23 - 29.)
- [9] 胡峰, 骆德渊, 雷霆, 等. 基于 Simulink/SimMechanics 的三自由度并联机器人控制系统仿真[J]. 自动化与仪器仪表, 2012(5): 221 - 223.  
(HU Feng, LUO Deyuan, LEI Ting, et al. Simulation of three degree of freedom parallel robot control system based on Simulink/SimMechanics[J]. Automation & instrumentation, 2012(5): 221 - 223.)
- [10] 曲展龙. 六自由度并联机构的仿真与结构优化[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.  
(QU Zhanlong. Simulation and optimization of 6-DOF stewart parallel manipulator[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.)
- [11] 葛挺, 王海名, 陆云凤. CAD 软件与 Matla/SimMechanics 接口问题研究[J]. 机电信息, 2011(24): 201 - 202.  
(GE Ting, WANG Haiming, LU Yunfeng. Study on the interface between CAD software and Matlab/SimMechanics[J]. Mechanical and electrical information, 2011(24): 201 - 202.)
- [12] 肖华. 六自由度 Stewart 并联机构结构的优化设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.  
(XIAO Hua. Optimal structure designing of 6-DOF Stewart parallel manipulator[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011: 37 - 39.)
- [13] 郭宗和, 杜晴晴, 杨启志. 新型 3-PRRS 并联机构的位置正反解分析[J]. 中国机械工程, 2015(4): 451 - 455.  
(GUO Zonghe, DU Qingqing, YANG Qizhi. Forward and inverse position kinematics analysis of a new 3-PRRS parallel mechanism[J]. China mechanical engineering, 2015(4): 451 - 455.)
- [14] 王秀刚, 苏建, 曹晓宁, 等. 基于旋转矩阵正交性的转向架 6 自由度平台位姿正解解算[J]. 吉林大学学报(工学版), 2013(5): 1241 - 1246.  
(WANG Xiugang, Su Jian, Cao Xiaoning, et al. Forward kinematics solution of bogie 6-DOF platform based on the orthogonality of rotation matrix[J]. Journal of Jilin university (engineering and technology edition), 2013(5): 1241 - 1246.)
- [15] 徐传敬, 赵敏, 李天明. 一种改进遗传算法的 PID 参数整定研究[J]. 计算机技术与发展, 2016(9): 12 - 15.  
(XU Chuanjing, ZHAO Min, LI Tianming. Research on PID parameter tuning based on improved genetic algorithm[J]. Computer technology and development, 2016(9): 12 - 15.)
- [16] 周兵, 赵景辉. PID 调节器参数整定实验方法研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2016(3): 112 - 113.  
(ZHOU Bing, ZHAO Jinghui. Experimental study on parameter tuning of PID regulator[J]. Automation & instrumentation, 2016(3): 112 - 113.)
- [17] 王娟. PID 控制器参数稳定域与自调整技术的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.  
(WANG Juan. Research on PID controller parameter stable set and self-tuning strategy[D]. Xi'an: Xidian University, 2013.)
- [18] 杨璐, 雷菊阳. 基于 MATLAB 的参数自整定模糊 PID 控制器的两种设计方法[J]. 计算机测量与控制, 2015(4): 1212 - 1214.  
(YANG Lu, LEI Juyang. Two design methods of parameters self-tuning fuzzy-PID controller in matlab[J]. Computer measurement & control, 2015(4): 1212 - 1214.)
- [19] 杨春龙. 基于同步控制思想 PID 的 Stewart 平台控制系统仿真分析[J]. 水雷战与舰船防护, 2014(3): 56 - 59.  
(YANG Chunlong. Simulation and analysis of stewart platform control system based on PID with synchronous control principle[J]. Mine warfare & ship self-defence, 2014(3): 56 - 59.)
- [20] 张嫦利, 王磊, 李博, 等. PID 参数对动力定位系统定位精度的影响[J]. 实验室研究与探索, 2015(3): 8 - 12.  
(ZHANG Changli, WANG Lei, LI Bo, et al. The influence of PID parameters on the positioning accuracy of the dynamic positioning system[J]. Research and exploration in laboratory, 2015(3): 8 - 12.)