

Stewart 平台多能域系统动力学全解建模与实验

李永泉^{1,2} 刘天旭^{1,2} 王立捷^{1,2} 张立杰^{2,3} 程雪利⁴

(1. 燕山大学河北省并联机器人与机电系统实验室, 秦皇岛 066004;

2. 燕山大学先进锻压成形技术与科学教育部重点实验室, 秦皇岛 066004;

3. 燕山大学河北省重型机械流体动力传输与控制实验室, 秦皇岛 066004; 4. 河南工学院机械工程系, 新乡 453002)

摘要: 围绕六自由度 Stewart 并联平台的多能域动力学建模展开研究。首先, 采用旋量键合图建立了电动缸驱动 Stewart 平台机构本体动力学模型, 采用传统键合图建立了伺服电动缸键合图模型, 得到了该平台完整的机、电耦合的多能域系统动力学全局模型。其次, 给定平台末端轨迹, 对比 Matlab 理论计算、ADAMS 软件仿真以及实验实测驱动力结果, 验证了 Stewart 平台机构本体旋量键合图模型的正确性。最后, 借助理论计算得到的驱动力, 由平台系统多能域动力学全解模型进一步计算得到伺服电机电流, 与通过实验得到的电机电流实测值对比, 验证了该平台多能域系统动力学全解模型的正确性。为后续包含驱动单元惯性参数和摩擦参数在内的动力学参数辨识以及平台控制研究奠定了基础。

关键词: 并联机构; 动力学建模; 旋量键合图; 多能域

中图分类号: TP242 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)04-0404-08

Multi-energy Domain Dynamic Full Solution Model and Experiment of Stewart Platform

LI Yongquan^{1,2} LIU Tianxu^{1,2} WANG Lijie^{1,2} ZHANG Lijie^{2,3} CHENG Xueli⁴

(1. *Parallel Robots and Mechatronic Systems Laboratory, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China*

2. *Key Laboratory of Advanced Forging and Stamping Technology and Science, Ministry of Education, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China*

3. *Hebei Provincial Key Laboratory of Heavy Machinery Fluid Power Transmission and Control, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China*

4. *Department of Mechanical Engineering, Henan Institute of Technology, Xinxiang 453002, China*)

Abstract: Dynamic model of parallel mechanism is on the dynamics analysis, kinetic parameters optimization and the basis of the dynamic parameter identification, and the accurate dynamics model is the premise to realize its high speed and high precision control. The multi-energy domain dynamics modeling of six degrees of freedom Stewart parallel platform was studied. Firstly, the dynamic model of the Stewart platform driven by electric cylinder was established by using the screw bond graph, the equation of state was derived by using the traditional bond graph, the servo electric cylinder bond graph model was established, and the equation of state was derived, according to that, connecting the drive end to the mechanical body, and the whole solution of the dynamic model of multi-energy domain system would be obtained. Secondly, given the end trajectory of the platform, the drive displacement obtained by the reverse solution accorded with the requirement of trajectory planning on motion stability, the dynamic complete solution included the driving force and joint binding force was obtained by combining the state equation and comparing the theory calculation in Matlab, the simulation results in ADAMS and the real value of the driving force in experiment, the curve fitting degree was high which verified the correctness of the screw bond graph model. Finally, by means of driving force with theory calculate and the whole

收稿日期: 2018-01-05 修回日期: 2018-03-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(51405421, 51275438)和河北省自然科学基金项目(E2015203101)

作者简介: 李永泉(1979—), 男, 副教授, 主要从事并联机构及机器人技术研究, E-mail: lijian197879@sina.com

通信作者: 张立杰(1969—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事并联机构及机器人技术研究, E-mail: ljzhang@ysu.edu.cn

solution of the multi-energy domain dynamics model, the servo motor current was got, compared with the real value of the current, the correctness of the whole solution of multi-energy domain dynamics model would be verified. It laid a foundation for the identification of dynamic parameters and the research of platform control for the following parameters, including the inertial parameters and friction parameters of the drive unit.

Key words: parallel mechanism; dynamic modeling; screw bond graph; multi-energy domain

0 引言

并联机构的动力学模型是对其进行动力学分析、动力学优化以及动力学参数辨识的基础,而且准确的动力学模型是对机构高速高精度控制的前提。牛顿-欧拉法、拉格朗日方程法、虚功原理法和凯恩方程法是目前常用的并联机构动力学建模方法。这些方法在 Stewart 平台机构的动力学建模中得到了广泛的应用。文献[1-3]采用牛顿-欧拉法建立了该平台的动力学模型,通过对运动杆件的单独分析,列出运动杆件的牛顿方程,通过消去中间变量,得到包含关约束力的整体动力学方程;文献[4-6]应用拉格朗日方程法,依据系统动能和势能构造拉格朗日函数,基于运动学模型计算系统动能、势能以及广义力,从而建立 Stewart 平台只包含驱动力而并没有关约束力的动力学模型;文献[7-10]采用虚功原理建立了该平台动力学模型,引入虚位移和虚功的概念,基于惯性力和驱动力所做虚功之和为零这一基本思想,得到多刚体系统的动力学模型;鹿玲等^[11]利用凯恩方程法对 5UPS/PRPU 进行动力学建模。李兵等^[12]采用凯恩方程法对 Stewart 平台进行动力学建模,基本思想是广义惯性力和广义主动力之和为零,从而得到系统不含约束力的动力学方程。李鹭扬等^[13]利用凯恩方程建立了 Gough-Stewart 平台的高效动力学模型。此外,FIJANY 等^[14]提出了一种新的算法,利用投影矩阵将平台的速度、加速度信息与关节的速度、加速度信息直接关联,建立了平台的动力学模型。以上方法都是针对机构本体建立的单一能域的动力学模型,而机器人系统本身可能包含伺服电机、液压缸、电动缸等驱动部分的一种或几种组合,本身属于多能域耦合系统。经典的动力学建模方法局限于并联机构机械部分本体的动力学建模,若要构建系统多能域全局动力学模型,需要对各个能域包含的子系统分别建模,建立中间变量将各个系统联系起来解,这就增加了动力学状态方程变量的数目,并使建模过程变得十分复杂,降低了模型的准确性。

为解决多能域子系统之间的相互作用,功率键合图(Bond graph)理论于 1959 年由 PAYNTER^[15]提

出。经过 KARNOPP 等^[16-17]的研究,键合图理论日益完善。针对 Stewart 并联机构,先后有 DAMIC 等^[18]、YILDIZ 等^[19]采用功率键合图构建了包含驱动电机在内的键合图模型,并推导了平台的状态方程。但是由于 Stewart 平台分支较多且属于一个空间多自由度、多体系统,其键合图模型复杂度高、耦合性强,采用传统键合图理论建立的机构动力学模型复杂。为此,文献[20-21]在机构动力学建模过程中引入旋量理论,综合了旋量理论在描述空间构件以及键合图理论在多能域动力学建模的优势,提出旋量键合图概念。本文综合旋量理论在描述并联机构运动学方面的优势,结合键合图理论在动力学建模方面的简洁性,对并联机构的多能域动力学进行建模。

1 Stewart 平台介绍

Stewart 平台机构简图如图 1a 所示,其定平台上 6 个万向铰 U 的铰点用 $A_1, A_2, \dots, A_6$ 表示,动平台上 6 个球铰 S 的铰点用 $B_1, B_2, \dots, B_6$ 表示,定平台和动平台通过 6 个完全相同的 UPS 支链相连,移动副 P 作为驱动副,由电动缸实现支链的伸缩运动。在定平台上建立定坐标系 $Oxyz$,坐标原点 O 位于万向铰所在平面的几何中心, z 轴为过中心点 O 的竖直轴,它与定平台所在平面垂直, x 轴垂直于 A_1A_6 , y 轴由右手定则确定。同样建立动坐标系 $O_1x_1y_1z_1$,即惯性系 Ψ_0 。坐标原点 O_1 位于球铰所在平面的几何中心, x_1 轴垂直于 B_1B_6 , z_1 轴垂直于运动平台所在平面, y_1 轴由右手螺旋定则确定。图 1b 为 Stewart 平台的三维模型。

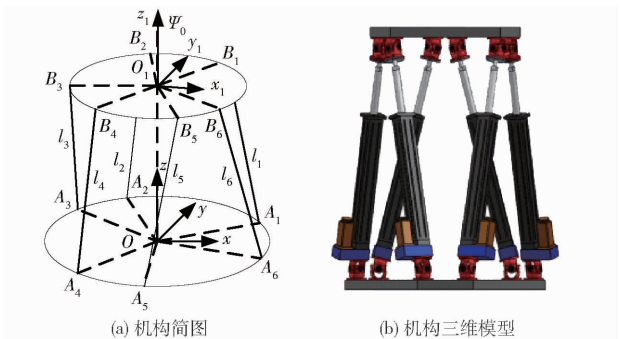


图 1 Stewart 平台
Fig. 1 Stewart platform

2 Stewart 平台机构本体旋量键合图模型

2.1 支链坐标系和动平台坐标系建立

首先建立用于旋量键合图建模的支链坐标系，如下：

杆件质心坐标系：简化驱动支链，假设支链上下连杆的质心 C_{ui} 、 C_{di} 位于支链伸缩方向上，如图 2 所示，在质心处构建与惯性系 Ψ_0 各坐标轴方向平行的坐标系 Ψ_{ui} 、 Ψ_{di} 。

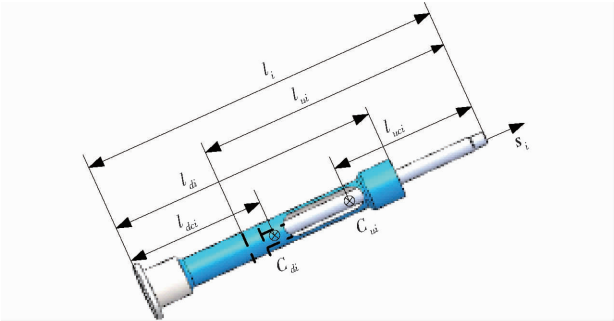


图 2 驱动支链结构图
Fig.2 Structure diagram of drive chain

支链坐标系：如图 3 所示，在万向铰转动中心处，建立支链坐标系 Ψ_{-i} ($i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$)，坐标原点为 A_i ，其 z_{-} 轴沿支链伸缩方向由 A_i 指向 B_i ， y_{-} 轴垂直于平面 OA_iB_i ，沿 z_{-} 负方向作为顺时针方向，则 $x_{-} = y_{-}z_{-}$ 。

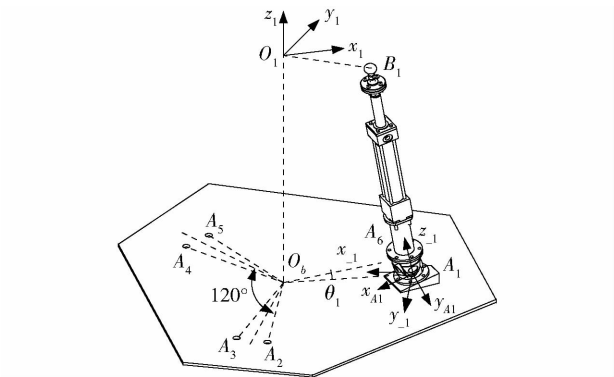


图 3 驱动支链分布图
Fig.3 Distribution diagram of drive chain

运动副接触坐标系：首先，在万向铰转动中心 A_i 处建立万向铰接触坐标系 Ψ_{Ai} ($i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$)，令 y_{Ai} 轴方向为万向铰十字轴轴线的方向，分布如图 3 所示， x_{Ai} 轴垂直于 y_{Ai} 轴和支链伸缩方向 s_i 构

成的平面，即 $x_{Ai} = y_{Ai}s_i$ ，则 $z_{Ai} = x_{Ai}y_{Ai}$ ；接着，分别在电动缸活塞杆和缸体接触点 K_i 和球铰转动中心 B_i 处，建立移动副接触坐标系 Ψ_{Ki} 和球铰接触坐标系 Ψ_{Bi} ，各坐标轴方向平行于支链坐标系 Ψ_{-i} 的各坐标轴方向。

假设机构动平台受作用在 E 点载荷 W_e ，如图 4 所示。以 E 点为原点，建立与惯性系 Ψ_0 平行的载荷坐标系 Ψ_E 。

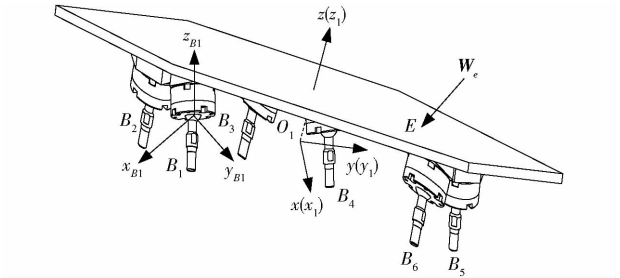


图 4 动平台组件结构图
Fig.4 Structure diagram of moving platform

2.2 Stewart 平台机构本体旋量键合图建模

Stewart 平台的运动组件可视为由驱动支链组件和动平台组件两部分组成，其中驱动支链组件由移动副即伺服电缸、万向铰、球铰及测力传感器组成；动平台组件由动平台及球铰安装楔块组成。分别对这两部分进行旋量键合图建模。

根据文献[20]建立 UPS 支链旋量键合图，如图 5 所示。由于万向铰连接定平台，速度为 0，因此采用 0 流源作为输入；而球铰连接动平台，通过键②/③/④/⑤/⑥/⑦，将驱动支链旋量键合图连接到动平台旋量键合图。键①则表示连接到电动缸驱动子系统键合图。建立动平台旋量键合图模型，如图 6 所示。

根据图 5 驱动支链键合图模型，列写驱动支链的状态方程

$$\begin{cases} \dot{P}_{di} = W_{gdi}^{di} + Ad_{H_{di}^{Ai}}^T W_{cAi}^{Ai} - Ad_{H_{di}^{Ki}}^T (W_{cKi}^{Ki} + W_{ai}^{Ki}) \\ \dot{P}_{ui} = W_{gui}^{ui} + Ad_{H_{ui}^{Ki}}^T (W_{cKi}^{Ki} + W_{ai}^{Ki}) - Ad_{H_{ui}^{Bi}}^T W_{cBi}^{Bi} \end{cases} \quad (1)$$

其中 $W_{cAi}^{Ai} = [0 \quad 0 \quad \tau_{Aiz} \quad f_{Aix} \quad f_{Aiy} \quad f_{Aiz}]^T$

$W_{cKi}^{Ki} = [\tau_{Kix} \quad \tau_{Kiy} \quad \tau_{Kiz} \quad f_{Kix} \quad f_{Kiy} \quad 0]^T$

$W_{cBi}^{Bi} = [0 \quad 0 \quad 0 \quad f_{Bix} \quad f_{Biy} \quad f_{Biz}]^T$

$W_{ai}^{Ki} = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad F_{ai}]^T$

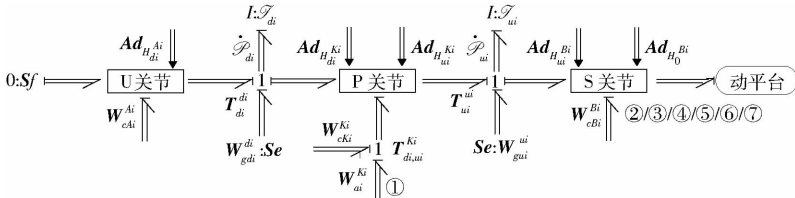


图 5 驱动支链旋量键合图
Fig.5 Screw bond graph of drive branch chain

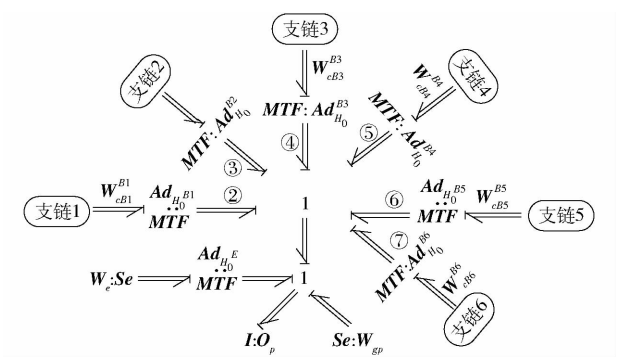


图 6 动平台旋量键合图

Fig. 6 Screw bond graph of moving platform

$W_{gdi}^{di} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -m_{di}g]^T$
 $W_{gui}^{ui} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -m_{ui}g]^T$

式中 W_{cAi}^{Ai} 、 W_{cKi}^{Ki} 、 W_{cBi}^{Bi} ——运动副接触坐标系 Ψ_{Ai} 、 Ψ_{Ki} 和 Ψ_{Bi} 下万向铰、移动副、球铰处的约束力旋量
 W_{ai}^{Ki} ——在接触坐标系 Ψ_{Ki} 下的驱动力旋量
 W_{gdi}^{di} 、 W_{gui}^{ui} ——重力旋量
 m_{di} 、 m_{ui} ——支链下、上连杆的质量

根据图 6 动平台键合图模型,可得动平台状态方程为

$$\dot{P}_p = W_{gp} + \sum_{i=1}^6 Ad_{h_0}^{T} W_{cBi}^{Bi} + Ad_{h_0}^{T} W_e \quad (2)$$

式(1)、(2)分别是驱动支链以及动平台的状态方程,即 Stewart 平台机构本体动力学模型,共包含 78 个未知量,对应的可以列出 78 个状态方程,可以得到该平台机构本体的动力学全解。

2.3 Stewart 平台机构本体逆向动力学仿真

平台机构的逆向动力学模型是分析其动态性能及参数辨识的基础,基于机构的旋量键合图得到的状态方程,利用 Matlab 编程软件和 ADAMS 动力学仿真软件对其动力学模型进行仿真验证。

给定机构的参数,如表 1 所示。其中, R_1 、 R_2 、 R_3 分别为上下平台半径以及上下平台初始安装高度, m_d 、 m_u 、 m_p 分别为支链下、上连杆以及动平台质量。由于 6 条驱动支链具有相同的结构形式,所选用的万向铰、电缸、球铰及辅助组件型号相同,因此参数设置完全相同。其中,上下连杆和平台的主轴转动惯量分别为 $I_{dc} = \text{diag}[1.949 \ 1.983 \ 0.069 \ 9] \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 、

表 1 Stewart 平台部分参数

Tab. 1 Part of Stewart platform parameters

参数	数值	参数	数值
R_1/m	0.340	l_u/m	0.602
R_2/m	0.460	l_{uc}/m	0.306
R_3/m	1.095	m_d/kg	34.5
l_d/m	0.783	m_u/kg	5.8
l_{dc}/m	0.304	m_p/kg	61.2

$I_{uc} = \text{diag}[0.206 \ 0.206 \ 0.0195] \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 、 $I_{pc} = \text{diag}[2.66 \ 5.30 \ 2.66] \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。

为使机构工作空间最大,令机构初始姿态为 $\psi = 0^\circ$ 、 $\varphi = 0^\circ$ 、 $\theta = 0^\circ$ 。采用组合正弦函数^[22]对末端运动轨迹进行轨迹规划,末端运动轨迹如图 7 所示,通过反解计算得到电动缸的运动学信息,如图 8 所示。

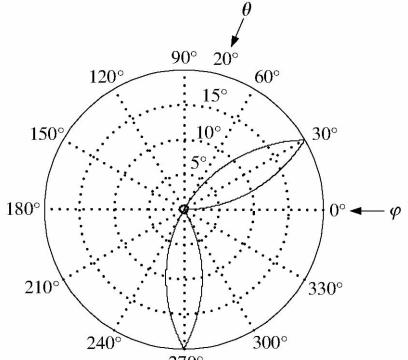


图 7 末端 P 的运动轨迹

Fig. 7 Trajectory of end P

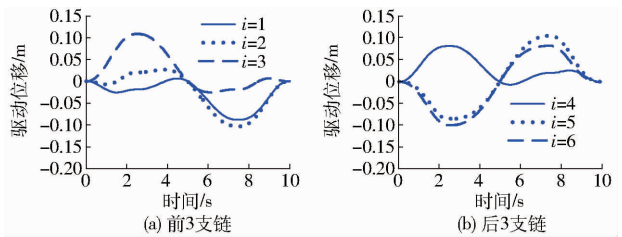


图 8 驱动位移

Fig. 8 Drive displacement

根据机构的运动学信息和状态方程,利用 Matlab 软件计算得到机构驱动力,如图 9 所示;同时,建立机构三维模型,利用 ADAMS 软件对其进行仿真,仿真验证模型如图 10 所示,得到机构驱动力如图 11 所示。对比图 9 和图 11,由于在理论计算中忽略了球铰及万向铰等构件的惯量,从而使得理论值与仿真值产生了微小偏差。但是,误差相对于驱动力数值很小,因此可以验证基于旋量键合图得到的动力学模型的准确性。

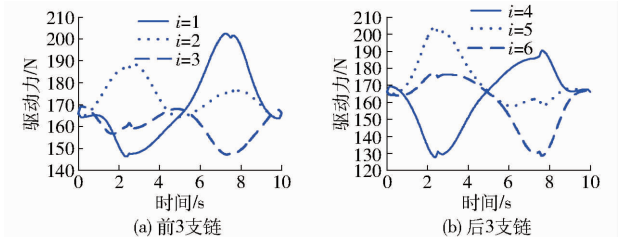


图 9 理论计算驱动力

Fig. 9 Theory value of driving force

基于旋量键合图模型得到的状态方程,动力学全解除了 6 条支链的驱动力之外,还包括任意时刻万向铰、移动副和球面副处的约束力。驱动支链各个关节约束力变化如图 12 ~ 14 所示。



图 10 ADAMS 仿真模型

Fig. 10 Simulation mode in ADAMS

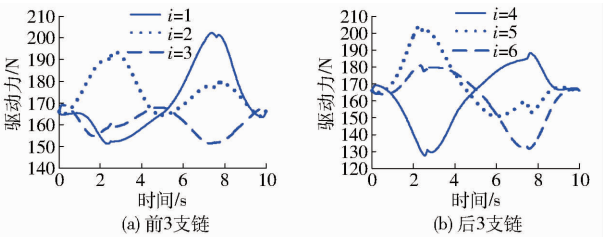


图 11 仿真驱动力

Fig. 11 Driving force of simulation

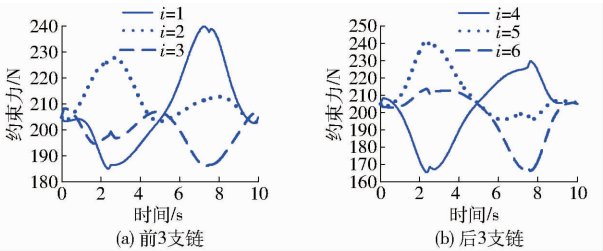


图 12 万向铰处约束力

Fig. 12 Constraint force of universal joints

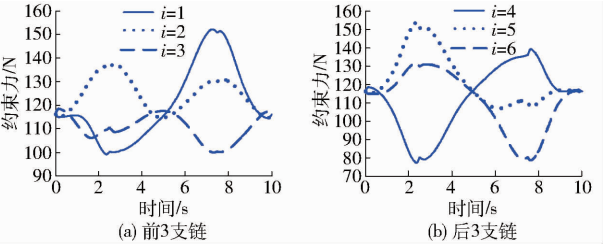


图 13 球铰处约束力

Fig. 13 Constraint force of spherical joints

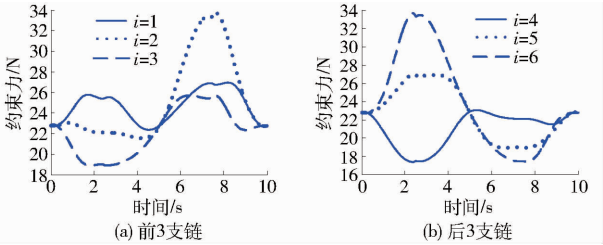


图 14 移动副处约束力

Fig. 14 Constraint force of translational joints

3 Stewart 平台多能域系统动力学模型

3.1 伺服电动缸键合图模型

Stewart 平台采用电动缸作为执行机构。电动

缸是将伺服电机与丝杠一体化设计的模块化产品，伺服电机转子的旋转运动通过滚珠丝杠机构转化为推杆的直线运动。其工作原理如图 15 所示。伺服电机及滚珠丝杠机构采用传统键合图建模，键合图模型如图 16 所示。

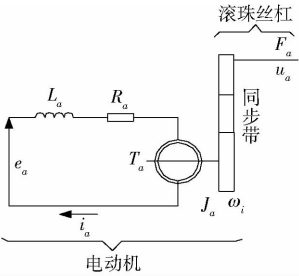


图 15 电动缸物理模型

Fig. 15 Physical model of electric cylinder

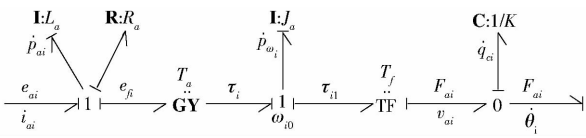


图 16 电动缸键合图模型

Fig. 16 Bonding graph model of electric cylinder

分别选取 p 和 q 作为状态变量,则状态方程为

$$\begin{cases} \dot{p}_{ai} = L_a \dot{i}_{ai} = e_{ai} - e_{fi} - R_a i_{ai} = e_{ai} - T_a \omega_{i0} - R_a i_{ai} \\ \dot{p}_{\omega_i} = J_a \dot{\omega}_{i0} = \tau_i - \tau_{i1} = T_a i_{ai} - T_f \tau_{i2} = T_a i_{ai} - T_f K q_{ci} \\ \dot{q}_{ci} = \omega_{i2} - \dot{\theta}_i = T_f \omega_{i0} - \dot{\theta}_i \end{cases} \quad (3)$$

式中 L_a ——电机电枢电感 R_a ——电机电枢电阻
 J_a ——电机转子以及同步带轮惯量
 T_a ——电机电磁转矩常量
 T_f ——滚珠丝杠导程
 K ——滚珠丝杠扭矩刚度,为无穷大

3.2 Stewart 平台多能域系统动力学模型

将 Stewart 平台机构本体旋量键合图与伺服电动缸驱动系统键合图结合,建立完整 Stewart 平台机、电耦合的多能域系统动力学全解模型,如图 17 所示。

依据式(1)~(3),运行图 7 所示轨迹,可理论计算电机电流变换情况,如图 18 所示。对比图 9 与图 18 可以看出,电机电流和驱动力呈一定的比例关系,这符合伺服电动缸的特点,此外,电机电流的变化曲线的峰值并未超过所选电机的额定电流,可以验证所选伺服电机在此工况下满足要求。

4 实验

在加工完成 Stewart 平台机构样机的基础上,选取辅助的实验设备,完成平台机构本体动力学验证实验。实验样机和控制系统如图 19 所示,实验设备结构如图 20 所示。

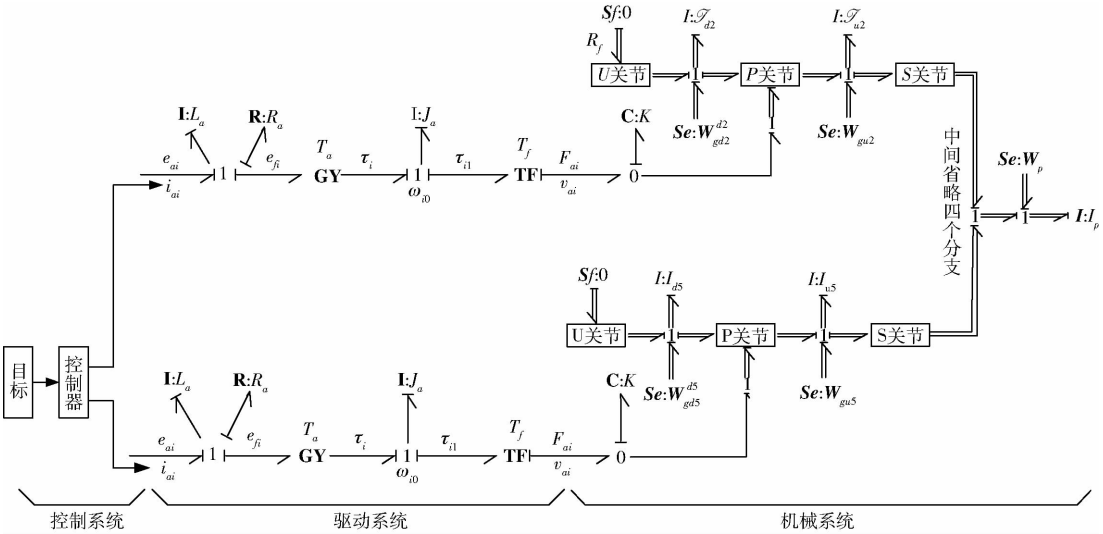


图 17 Stewart 平台机、电耦合的多能域系统动力学全局模型

Fig. 17 Model of multi-energy domain dynamics of Stewart platform, which was mechanical and electronic coupling systems

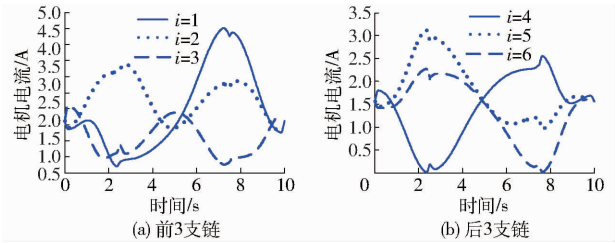


图 18 电机电流理论计算值

Fig. 18 Theory value of motor current

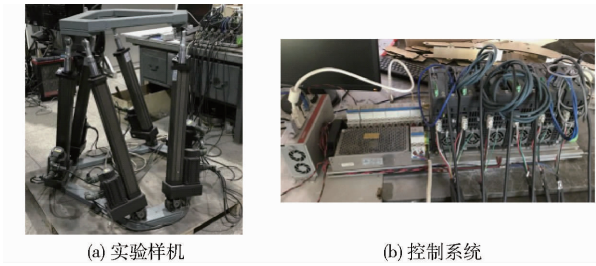


图 19 实验系统

Fig. 19 System of experiment

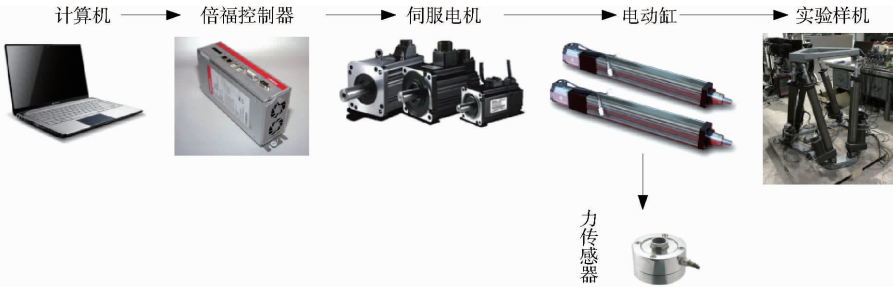


图 20 实验装置

Fig. 20 Device of experiment

其中,控制器选用倍福公司生产的 C6920 - 0050 型控制器,伺服电机选用的是中达电通公司的 ECMA - C11010SS 型伺服电机,电动缸选用上海涟恒公司伺服电动缸,型号为 AH75 - S500 - B - T - 10 - M3 - C1 - 2,物理参数如表 2 所示,力传感器的型号为 LH - S50。

表 2 电动缸的物理参数

Tab.2 Physical parameters of electric cylinder

参数	L_a/H	R_a/Ω	$J_a/(kg \cdot m^2)$	$T_a/(N \cdot m \cdot A^{-1})$	T_f/mm
数值	1.81×10^{-3}	0.2	3.33×10^{-4}	0.44	0.1

4.1 Stewart 平台机构本体动力学验证实验

令机构运行图 7 所示轨迹,机构不同位姿如图 21 所示,通过力传感器采集数据,并进行滤波处

理,得到驱动力数据的实测值,和理论计算值进行对比,结果如图 22 所示。对比图 22、图 9、图 11,三者符合度较高,从而证明基于旋量键合图所得机构本体动力学模型的正确性。

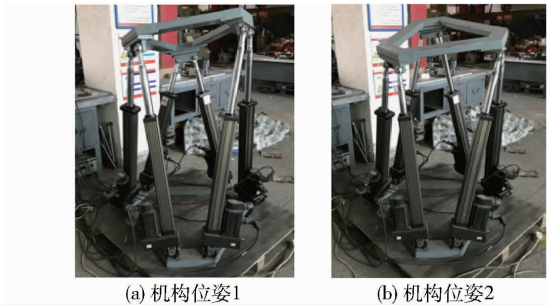


图 21 机构位姿

Fig. 21 Position of mechanism

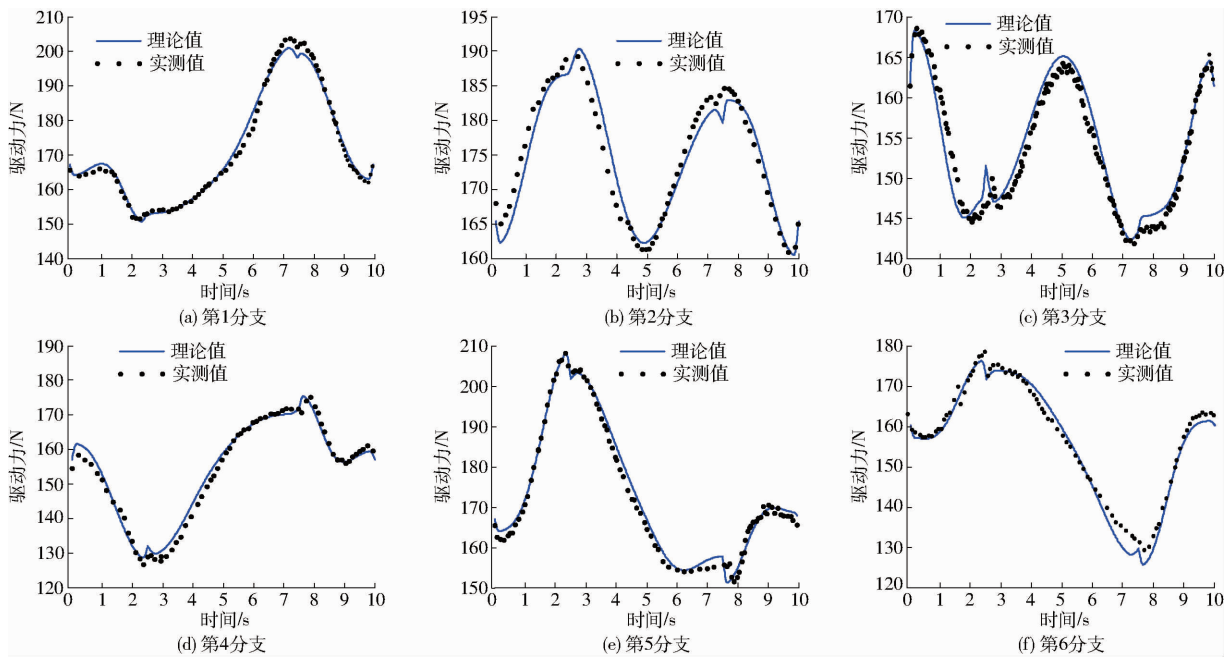


图 22 驱动力理论值与实测值对比

Fig. 22 Comparisons of driving force between theory and measured values

4.2 Stewart 平台机构多能域动力学模型验证实验

将数据线一端连接驱动器,一端连接装有与所选台达电机配套的 ASDA - SOFT 软件的计算机,通过软件中的示波器,读取实验电机电流,并

将数据保存为 .TXT 格式的文件,和理论计算值进行对比,结果如图 23 所示,两者误差较小,从而验证了 Stewart 平台多能域系统动力学全解模型的正确性。

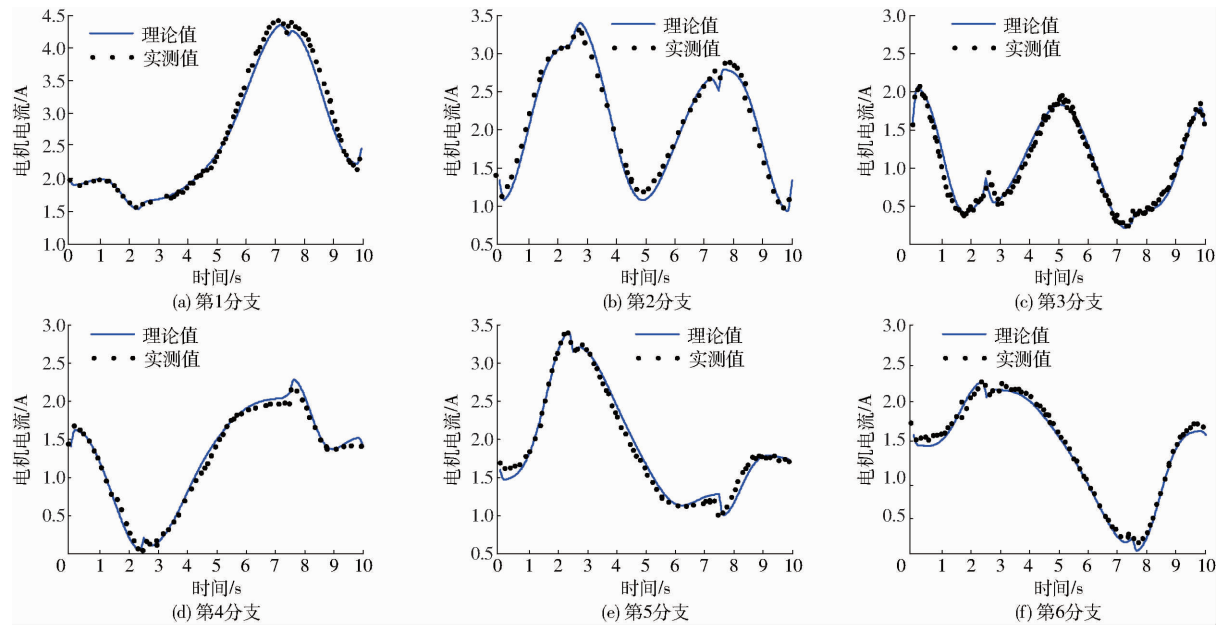


图 23 电机电流实测值与理论值对比

Fig. 23 Comparisons of motor current between measured and theory values

5 结束语

采用旋量键合图建立了电动缸驱动 Stewart 平台机构本体动力学模型,采用传统键合图建立了伺服电动缸键合图模型,得到了该平台完整的机、电耦

合的多能域系统动力学全解模型;并通过仿真分析与设计实验两方面验证了平台机电耦合多能域系统动力学全解的正确性,为后续包含驱动单元惯性参数和摩擦参数在内的动力学参数辨识以及平台控制研究奠定了基础。

参 考 文 献

- 1 DASGUPTA B, MRUTHYUNJAYA T S. A Newton – Euler formulation for the inverse dynamics of the Stewart platform manipulator [J]. Mechanism & Machine Theory, 1998, 33(8):1135 – 1152.
- 2 KHALIL W, GUEGAN S. A novel solution for the dynamic modeling of Gough – Stewart manipulators [C] // Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2002, 1:817 – 822.
- 3 KHALIL W, IBRAHIM O. General solution for the dynamic modeling of parallel robots [J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2007, 49(1):19 – 37.
- 4 WANG J, GOSSELIN C M. A new approach for the dynamic analysis of parallel manipulators [J]. Multibody System Dynamics, 1998, 2(3):317 – 334.
- 5 ABDELLATIF H, HEIMANN B. Computational efficient inverse dynamics of 6-DOF fully parallel manipulators by using the Lagrangian formalism [J]. Mechanism & Machine Theory, 2009, 44(1):192 – 207.
- 6 吕帮俊, 彭利坤, 邢继峰, 等. Gough – Stewart 并联机器人刚体动力学模型 [J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2011, 39(10):14 – 18.
LÜ Bangjun, PENG Likun, XING Jifeng, et al. Rigid dynamic model of Gough – Stewart parallel robot [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2011, 39(10):14 – 18. (in Chinese)
- 7 TSAI L W. Solving the inverse dynamics of a Stewart – Gough manipulator by the principle of virtual work [J]. Journal of Mechanical Design, 2000, 122(1):3 – 9.
- 8 STAICU S. Dynamics of the 6 – 6 Stewart parallel manipulator [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2011, 27(1):212 – 220.
- 9 吕帮俊, 朱石坚, 邢继峰, 等. 基于虚功原理的 Stewart 机构逆动力学模型修正 [J]. 机械设计与研究, 2010, 26(4):42 – 44.
LÜ Bangjun, ZHU Shijian, XING Jifeng, et al. Modification of the inverse dynamics model of Stewart robot by the principle of virtual work [J]. Machine Design & Research, 2010, 26(4):42 – 44. (in Chinese)
- 10 张东胜, 许允斗, 姚建涛, 等. 五自由度混联机器人逆动力学分析 [J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(9):384 – 391. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170949&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.049.
ZHANG Dongsheng, XU Yundou, YAO Jiantao, et al. Inverse dynamics analysis of novel 5-DOF hybrid robot [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9):384 – 391. (in Chinese)
- 11 鹿玲, 姚建涛, 顾伟栋, 等. 基于 Kane 方程的冗余驱动 5UPS/PRPU 并联机床动力学分析 [J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(6):366 – 372. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160648&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.06.048.
LU Ling, YAO Jiantao, GU Weidong, et al. Dynamics analysis of 5UPS/PRPU parallel machine tool with redundant actuation based on Kane equation [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(6):366 – 372. (in Chinese)
- 12 李兵, 王知行, 李建生. 基于凯恩方法的新型并联机床动力学研究 [J]. 机械科学与技术, 1999, 18(1):41 – 43.
LI Bing, WANG Zhixing, LI Jiansheng. Dynamic study of new parallel machine tool based on Kane method [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 1999, 18(1):41 – 43. (in Chinese)
- 13 李鹭扬, 吴洪涛, 朱剑英, 等. Gough – Stewart 平台高效动力学建模研究 [J]. 机械科学与技术, 2005, 24(8):887 – 889.
LI Luyang, WU Hongtao, ZHU Jianying, et al. Study on the dynamic modeling of Gough – Stewart platform [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2005, 24(8):887 – 889. (in Chinese)
- 14 FIJANY A, FRIED G. Novel algorithms for computation of inverse kinematics and inverse dynamics of Gough – Stewart platform [C] // IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2012:1573 – 1580.
- 15 PAYNTER H M. Analysis and design of engineering systems [M]. Cambridge: M. I. T. Press, 1961.
- 16 KARNOPP D C, MARGOLIS D L, ROSENBERG R C. System dynamics: modeling, simulation and control of mechatronic systems [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2012:12 – 20, 53 – 58, 142 – 149, 256 – 259.
- 17 KARNOPP D C, MARGOLIS D L, ROSENBERG R C. System dynamics: modeling and simulation of mechatronic systems [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2006.
- 18 DAMIC V, COHODAR M. Dynamic analysis of Stewart platform by bond graphs [J]. Procedia Engineering, 2015, 100:226 – 233.
- 19 YILDIZ I, OMURLU V E, SAGIRLI A. A novel visualization technique in bond-graph method for modeling of a generalized Stewart platform [C] // 2008 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 2008:780 – 785.
- 20 郭菲, 李永泉, 宋肇经, 等. 旋量键合图在并联机构动力学建模中的应用 [J]. 机械工程学报, 2015, 51(23):12 – 20.
GUO Fei, LI Yongquan, SONG Zhaojing et al. Screw bond graph in the application of the parallel mechanism dynamics modeling [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(23):12 – 20. (in Chinese)
- 21 BONDERSON L S. Vector bond graphs applied to one-dimensional distributed systems [J]. Journal of Dynamic Systems Measurement & Control, 1975, 97(1):75 – 82.
- 22 李永泉. 球面 2 – DOF 并联机构的理论分析与实验研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2012:75 – 76.
LI Yongquan. Theory analysis and experiment research of spherical 2 – DOF parallel manipulator [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2012:75 – 76. (in Chinese)