

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2019.06.002

基于6-UPU型平台的动感座椅 运动分析与轨迹规划

严昊, 吴建民

(上海工程技术大学机械与汽车工程学院, 上海 201620)

摘要:针对娱乐场所的动感座椅由于结构限制不能模拟太复杂场景的情况,课题组提出以6-UPU型Stewart平台作为底座,设计了一种动感座椅。对该机构进行运动学和动力学分析及搭建数学模型。以应用为背景给动平台规划了一条复杂的运动轨迹,并将轨迹离散成一连串的轨迹点。基于ADAMS软件搭建了虚拟样机,将轨迹点导入ADAMS中运行,验证该设计的可行性。仿真结果表明该设计空间上更为灵活,可以用于模拟电影中复杂的情景。

关键词:动感座椅;Stewart平台;运动轨迹;ADAMS;虚拟样机

中图分类号:TP249 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2019)06-0007-05

Dynamic Seat Design and Trajectory Planning Based on 6-UPU Stewart Platform

YAN Hao, WU Jianmin

(Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: The dynamic seats for entertainment can not simulate too complex scenes due to structural constraints, the 6-UPU Stewart platform was used as the base to design a dynamic seat. The kinematics and dynamics of the mechanism were analyzed and the mathematical model was built. Taking the application as the background, a complex trajectory was planned for the moving platform, and the trajectory was discretized into a series of trajectory points. The virtual prototype was built by using ADAMS, and the track point was imported into ADAMS to run, so as to verify the feasibility of the design. Simulation results show that the design space is more flexible and can be used to simulate complex scenes in movies.

Keywords: dynamic seat; Stewart platform; motion trajectory; ADAMS; virtual prototype

随着娱乐产业的发展,4D影院开始慢慢出现。4D影院是在3D逼真的视听效果之上加入了触觉等模拟。4D影院通过配备动感座椅让观众体验到与电影情节符合的肢体感觉^[1]。目前已经投入使用的动感座椅可以完成前后左右的摇晃和上下的升降^[2],但是很少能做到多个方向的复合运动。动感座椅的底座多采用3个机械臂与上下平台相连的结构:邹晓晖^[3]和卞伟达^[4]等分别基于3-RPS和3-UPU并联机构设计了动感座椅。6-UPU型Stewart平台相比3-RPS和3-UPU型平台在空间上更加灵活,通过设定其上平台中心点的运动轨迹,结构更为牢靠,负载更大,位置精

度更高。课题组提出以6-UPU型Stewart平台作为底座,设计了一种动感座椅,以完成更加复杂的运动,更逼真地完成对电影情景的模拟。

1 平台参数设计和轨迹规划

图1所示为基于6-UPU平台的动感座椅的三维模型,参数如图2所示。上平台铰点外接圆半径 r_A 为300 mm;下平台铰点外接圆半径 r_B 为400 mm;上下平台短边对应的圆心角为 30° ;上下平台长边铰点对应的圆心角 90° ;肢体的初始长度 $l_i(i=1,2,\dots,6)$ 为470 mm;平台初始高度 h 为453 mm;各肢体最大伸长量为300 mm;上平台在Z轴上的垂直移动距离为 ± 50 mm;

收稿日期:2019-05-01;修回日期:2019-09-08

第一作者简介:严昊(1994),男,江苏金湖人,硕士,主要研究方向为机器人运动控制及轨迹规划。E-mail:740907876@qq.com

在 X 轴上的横向偏移距离为 ± 100 mm; 在 Y 轴上的纵向偏移距离为 ± 100 mm; 绕 X 轴转动的俯仰角 α 为 $\pm 15^\circ$; 绕 Y 轴转动的滚转角 β 为 $\pm 15^\circ$; 绕 Z 轴转动的偏转角 γ 为 $\pm 15^\circ$ 。

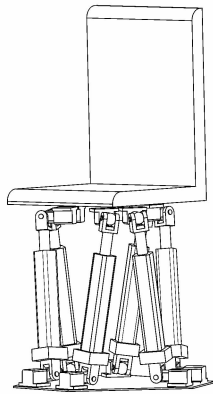


图 1 4D 影院座椅三维模型
Figure 1 Three-dimensional model of seats in 4D cinema

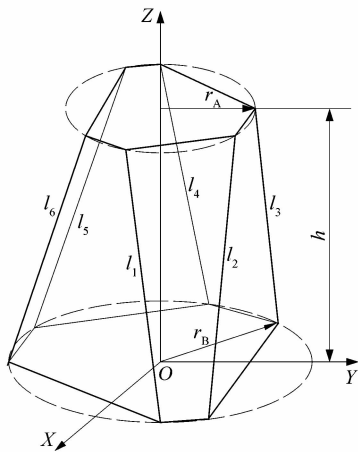


图 2 6-UPU 平台示意图
Figure 2 Diagram of 6-UPU

课题组参考一些 4D 电影中出现的旋涡、旋风等场景规划一条有实际应用价值的三维螺旋线^[5], 将运动方程输入到 MATLAB 中生成轨迹如图 3 所示, 螺旋线垂直移动范围为 480 ~ 580 mm, 横向与纵向移动范围为 ± 100 mm, 螺旋线切线与各坐标轴的夹角为 $\pm 15^\circ$ 。将规划好的方程输入 MATLAB 中画出三维曲线图。

2 Stewart 反解数学模型

2.1 运动学方程

Stewart 平台的主体部分由上、下平台以及 6 个液压缸组成。静止不动的下平台与可动的上平台分别通过上、下胡克铰与液压缸的两端相连。通过 6 个液压

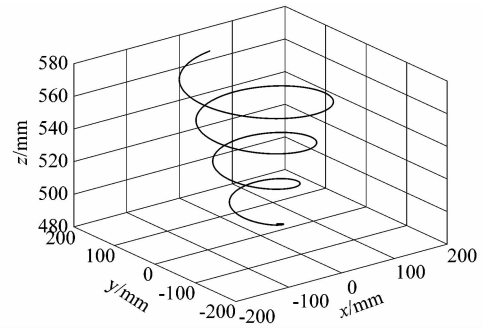


图 3 空间螺旋线轨迹

Figure 3 Spiral trajectory of space
缸的协调运动, 可以在空间分别实现 3 个方向的转动及各种空间运动的复合。

为了对 6 自由度平台进行轨迹规划, 需要对其进行运动学分析。通过平台各个肢体的长度, 求解运动平台位置和姿态的过程称为运动学正解。通过运动平台的位置和姿态, 求各个肢体长度的过程称为运动学反解^[6]。课题组在上平台上建立坐标系 $\{o'\}$, 在下平台上建立坐标系 $\{o\}$ 。坐标系 $\{o'\}$ 是动坐标系跟随上平台移动, 坐标 $\{o\}$ 是静坐标系, 轨迹方程建立在坐标系 $\{o\}$ 上^[7]。建立坐标系如图 4 所示。

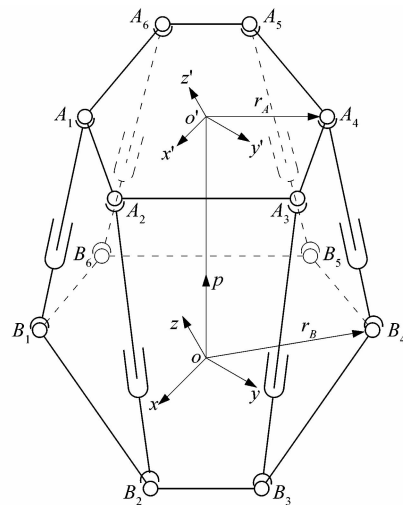


图 4 Stewart 平台机构简图

Figure 4 Stewart platform organization diagram

课题组通过求出肢体两 endpoint 位于坐标系 $\{o\}$ 上的坐标求出上平台各种姿态下肢体的长度, 输入肢体的变化量使上平台按预定轨迹运行。下平台连接点位于坐标系 $\{o\}$ 上的坐标保持不变, 上平台连接点位于坐标系 $\{o'\}$ 上的坐标保持不变, 在 $\{o\}$ 上的坐标随着轨迹的运行在变化。通过建立机构的反解数学模型, 将轨迹各离散点所对应的上平台连接点位于坐标系 $\{o'\}$ 上的坐标转换为位于坐标系 $\{o\}$ 上的坐标。

建立坐标矩阵。如图5所示上平台与肢体6个连接点位于坐标系 $\{o'\}$ 上的坐标表示为 A_i ($i=1,2,3,4,5,6$),下平台与肢体6个连接点位于坐标系 $\{o\}$ 上的坐标表示为 B_i ,上平台外接圆半径为 r_A ,下平台外接圆半径为 r_B 。上平台相邻铰接点之间的角度 θ 和下平台相邻铰接点之间的角度 γ 为 30° 。

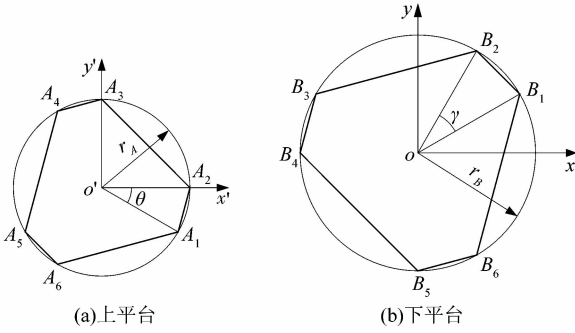


图5 上下平台俯视图

Figure 5 Top view of upper and lower platforms

求出上平台与肢体连接点位于坐标系 $\{o'\}$ 上的坐标矩阵 A ,下平台与液压缸连接点位于坐标系 $\{o\}$ 上的坐标矩阵 B :

$$A = r_A \times \begin{bmatrix} 1 & \cos \frac{\pi}{2} & \cos \frac{2\pi}{3} & \cos \frac{7\pi}{6} & \cos \frac{4\pi}{3} & \cos \frac{11\pi}{6} \\ 0 & \sin \frac{\pi}{2} & \sin \frac{2\pi}{3} & \sin \frac{7\pi}{6} & \sin \frac{4\pi}{3} & \sin \frac{11\pi}{6} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad (1)$$

$$R = R_{x,\alpha} \cdot R_{x,\beta} \cdot R_{x,\gamma} = \begin{bmatrix} \cos \beta \cdot \cos \gamma & -\cos \beta \cdot \sin \gamma & \sin \beta \\ \sin \alpha \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma + \cos \alpha \cdot \sin \gamma & -\sin \alpha \cdot \sin \beta \cdot \sin \gamma + \cos \alpha \cdot \cos \gamma & -\sin \alpha \cdot \cos \beta \\ -\cos \alpha \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma + \sin \alpha \cdot \sin \gamma & \cos \alpha \cdot \sin \beta \cdot \sin \gamma + \sin \alpha \cdot \cos \gamma & \cos \alpha \cdot \cos \beta \end{bmatrix}. \quad (7)$$

又有

$$P = [x_p \quad y_p \quad z_p]^T. \quad (8)$$

若 A_i', B_i 为各肢体两端的坐标,相减得到肢体的长度矢量,取 l_i 的模并求出肢体的长度

$$l_i = A_i' - B_i; \quad (9)$$

$$l_i = \sqrt{l_{ix}^2 + l_{iy}^2 + l_{iz}^2}. \quad (10)$$

2.2 动力学方程

通过动力学分析求得机构各支腿对上平台的作用力和上平台对外部环境(上平台上安置的座椅)的作用力与作用力矩。

动力学方程分为肢体动力学方程和运动平台动力学方程两部分。将机构分解为运动平台和6个相同的肢体^[8]。此外,假设每个肢体由气缸和活塞两部分组

$$B = r_B \times \begin{bmatrix} \cos \frac{\pi}{6} & \cos \frac{\pi}{3} & \cos \frac{5\pi}{6} & \cos \pi & \cos \frac{3\pi}{2} & \cos \frac{5\pi}{3} \\ \sin \frac{\pi}{6} & \sin \frac{\pi}{3} & \sin \frac{5\pi}{6} & \sin \pi & \sin \frac{3\pi}{2} & \sin \frac{5\pi}{3} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

将动平台各连接点位于坐标系 $\{o'\}$ 上的坐标 A_i 转换为坐标系 $\{o\}$ 上的坐标 A_i' ,转换方式可以看作是旋转加一段平移,坐标系 $\{o'\}$ 经过旋转矩阵 R 旋转到与坐标系 $\{o\}$ 平行的姿态,再沿着坐标系 $\{o'\}$ 原点与坐标系 $\{o\}$ 原点之间的矢量平移:

$$A' = P + RA. \quad (3)$$

式中: P 为坐标系 $\{o'\}$ 原点与坐标系 $\{o\}$ 原点之间的矢量,即离散点的坐标。旋转矩阵 R 由绕 X 轴旋转的俯仰角 α ,绕 Y 轴旋转滚动角 β ,绕 Z 轴旋转的偏转角 γ 的3个旋转矩阵相乘得到:

$$R_{x,\alpha} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}; \quad (4)$$

$$R_{x,\beta} = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix}; \quad (5)$$

$$R_{x,\gamma} = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (6)$$

成,确定其质心的速度和加速度。假设气缸和活塞的质心分别位于它们底部的上方 c_{i1} 和 c_{i2} 处,质量分别定义为 m_{i1} 和 m_{i2} 。此外,活塞关于它们的轴对称,它们的质心位于长度中心点处。

图6所示为肢体和运动平台的受力分析情况。与上平台连接点 A_i, B_i 处的反作用力定义为 f_{a_i}, f_{b_i} 。液压缸和活塞间的内部力和内部力矩定义为 f_{c_i} 和 M_{c_i} ,肢体角速度为 ω_i, s_i 为每条支腿的单位向量。

肢体中活塞部分的牛顿-欧拉方程:

$$-m_{i1}a_{i1} - f_{a_i} + f_{c_i} + m_{i1}g = 0; \quad (11)$$

$$-m_{i1}a_{i1} + m_{i1}g - \omega_i \times A_{i1} \omega_i + c_{i1}(s_i \times f_{a_i}) + c_{i1}(s_i \times f_{c_i}) + M_{c_i} = 0. \quad (12)$$

式中: A_{i1} 表示坐标原点位于 c_{i1} 上且与 $\{o'\}$ 平行的坐标

系下的活塞的惯性矩阵; a_{i_1} 为活塞质心的线加速度。

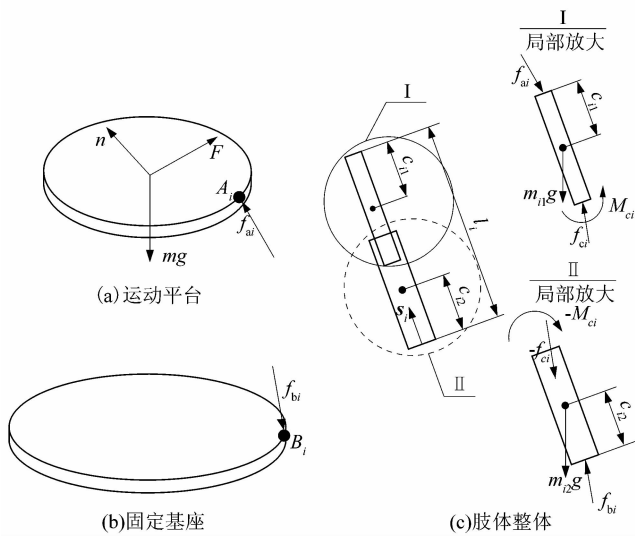


图 6 机械臂肢体和运动平台的受力情况

Figure 6 Force analysis of mechanical arm limb and movement platform

气缸部分的牛顿-欧拉方程:

$$-m_{i_2} a_{i_2} + f_{b_i} - f_{c_i} + m_{i_1} g = 0; \quad (13)$$

$$-m_{i_1} a_{i_2} + m_{i_2} g - \omega_i \times A_{i_2} \omega_i + c_{i_1} (s_i \times f_{b_i}) + d_i (s_i \times f_{c_i}) + M_{c_i} = 0; \quad (14)$$

$$d_i = l_i - c_{i_2} - 2c_{i_1} \circ \quad (15)$$

式中: A_{i_2} 表示坐标原点位于 c_{i_2} 上且与 $\{o'\}$ 平行的坐标系下的液压缸的惯性矩阵; d_i 是活塞下端到液压缸的距离。

肢体部分的方程联合得到作用在支腿对上平台的作用力:

$$f_i = -f_{a_i} = f_{c_i} s_i + m_{i_1} \omega_i^2 s_i + m_{i_1} a_{i_1} s_i - m_{i_1} g s_i \circ \quad (16)$$

假设运动平台的质心位于中点 P 上, 质量为 m , 转动惯量为 I_p (固定在坐标系 $\{o\}$ 上), ω 为动平台角速度, ω' 为动平台角加速度。平台的牛顿-欧拉方程如下所示:

$$-m a_p + \sum_{i=1}^6 f_{a_i} + m g = 0; \quad (17)$$

$$I_p \omega' + \omega \times I_p \omega - \sum_{i=1}^6 r_{A_i} \times f_{a_i} = 0. \quad (18)$$

雅克比矩阵为:

$$J = \begin{bmatrix} s_1 & s_2 & s_3 & s_4 & s_5 & s_6 \\ a_1 \times s_1 & a_2 \times s_2 & a_3 \times s_3 & a_4 \times s_4 & a_5 \times s_5 & a_6 \times s_6 \end{bmatrix}. \quad (19)$$

各支腿对上平台作用力矩阵为:

$$f = [f_1 \ f_2 \ f_3 \ f_4 \ f_5 \ f_6]^T. \quad (20)$$

a_i 为上平台中心点到平台与支腿连接点的向量。

雅克比矩阵与各支腿对上平台的作用力矩阵相乘得到上平台对外部的作用力 F 与作用力矩 n 。

$$\begin{bmatrix} F \\ n \end{bmatrix} = Jf. \quad (21)$$

为方便计算, 机构的运动学和动力学分析用 MATLAB 编程求解。

3 虚拟样机验证

使用 ADAMS 搭建虚拟样机运行预定轨迹, 来验证设计的合理性和可行性。在 SolidWorks 中绘出三维图导入到 ADAMS 中, 添加运动副和驱动: 在每条支腿的下铰接点处 (即液压缸与下平台相连处) 和上铰接点处 (即活塞杆与上平台相连处) 添加一个球副进行约束, 在活塞杆与液压缸接触位置添加一个圆柱副进行约束^[9-10]。运动副的位置也可按照上述方法进行参数化。最终建立的 ADAMS 虚拟样机模型如图 7 所示。

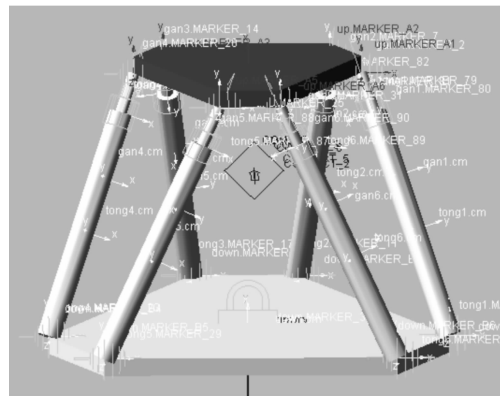


图 7 虚拟样机

Figure 7 Virtual prototype

将 MATLAB 计算的离散点对应肢体的变化量通过文本格式导入 ADAMS 中生成样条曲线数据。数据单元设置中, 在数据的第 1 列加入各仿真点的时间, 第 2 列为对应的伸长量, 将样条数据命名为 SPLINE_1 ~ SPLINE_6。在圆柱副处分别加上 6 个平移驱动, 平移驱动的函数设置为样条函数。以肢体 1 为例, 驱动函数是 CUBSPL(time, 0, SPLINE_1, 0), 其中样条函数的参数对应时间和所导入的样条曲线数据。在各肢体的上铰接点和下铰接点之间建立测量并将测量命名为 MEA_ganchang1 ~ MEA_ganchang6。进行运动仿真, 仿真时间设置为 5 s 步数 500。仿真的后处理中绘制测量到的肢体长度变化曲线图 (如图 7 所示), 可知平台中心做螺旋向上运动时, 各肢体也在向上做往复运动, 随着螺旋半径的增大, 往复运动的幅度越大。

分别测量上平台中心在 X, Y, Z 轴上的坐标如图

8~10所示。图9中,随着轨迹螺旋半径的增大,中心点在 X, Y 轴上坐标往复的幅度也在增大,最大幅度在100 mm以内,未超出限制。在 Z 轴上的坐标也随着轨迹上升而增大。

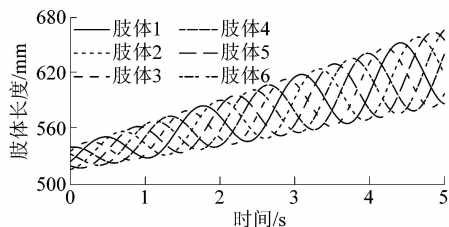


图8 轨迹运行时各肢体长度变化曲线

Figure 8 Curve of length variation of each rod during trajectory operation

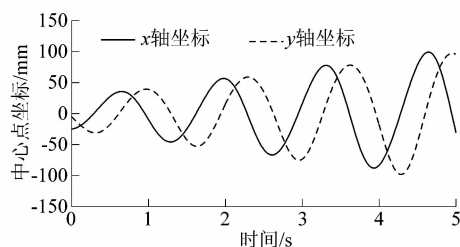


图9 上平台中心点的 X 和 Y 轴坐标

Figure 9 Center point X and Y coordinates of upper platform

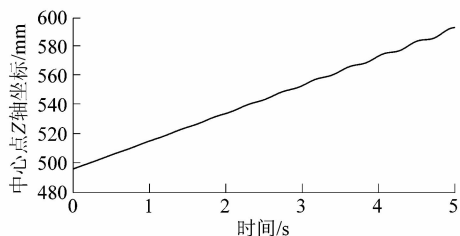


图10 上平台中心点 Z 轴坐标

Figure 10 Center point Z -axis coordinates of upper platform

如图8~10所示,虚拟样机完成了预定轨迹,表明设计合理可行。

4 结语

课题组设计了一种基于6-UPU平台的4D影院的座椅,用于模拟的电影情节中给观众提供肢体上的感觉,提高观众的观影体验。基于一些4D电影中常见情景,规划了一条三维螺旋曲线,并对轨迹离散化处理得到若干离散点坐标。对Stewart并联运动平台进行了运动学和动力学分析,得出了轨迹上不同离散点对应肢体的长度。根据MATLAB中解出的离散点对应的若干组肢体长度,输入虚拟样机中,运行轨迹验证了设计方案具有可行性。

参考文献:

- [1] FIGHTER E F. A Stewart platform-based manipulator: general theory and practical construction [J]. International Journal of Robotics Research, 1986, 5(2): 157-182.
- [2] 朱道, 许昌. 4D影院动感座椅控制系统的设计与研究[J]. 微计算机信息, 2010, 26(34): 92-93.
- [3] 邹晓晖, 陈润六, 王红州, 等. 一种新型4D动感座椅设备的设计与分析[J]. 制造业自动化, 2016, 38(8): 102-106.
- [4] 卞伟达. 嵌入式动感座椅系统的研究与实现[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017: 11-95.
- [5] KWON S T, KIM G S, CHUNG S Y, et al. A study on the physical effects in 4D[J]. Advanced Science and Technology Letters, 2014, 77: 9-13.
- [6] 黄真, 赵永生, 赵铁石. 高等空间机构学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 238-268.
- [7] 杜义浩. 并联机器人轨迹规划中的运动误差补偿方法研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2012: 27-63.
- [8] 陈莉. 六自由度并联机器人控制与应用研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2011: 15-39.
- [9] 沈晨, 胡磊. Stewart机构的虚拟样机设计与研究[J]. 机械工程与自动化, 2016(2): 86-87.
- [10] 党田峰. 液压六自由度并联机构虚拟样机研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008: 1-3.