

# Simulation for Stewart Parallel Robot with Fuzzy Self-Tuning PID Controller Based on ADAMS and MATLAB

Yongchao Fan, Yuesong Li, Qun Yu, Yuan Nie, Shuai Wang, Naiqiang Li

School of Mechatronics Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang Henan  
Email: [liyaosong707@163.com](mailto:liyaosong707@163.com)

Received: Aug. 10<sup>th</sup>, 2015; accepted: Aug. 31<sup>th</sup>, 2015; published: Sep. 4<sup>th</sup>, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

In order to obtain the simulation model, the model of Stewart parallel mechanism is established with the help of ADAMS; the Stewart parallel robot system with fuzzy self-tuning PID controller is given based on Simulink. Stepping from  $Z = 0$  to  $Z = 1$  m, peak time of Stewart parallel robot is 0.25 s, and steady state error is less than 0.01 m. The proportional coefficient is rising to 2.68 after declining. At first, integral coefficient is zero, and it rises to 0.08 quickly at 0.05 s.

## Keywords

Stewart Parallel Mechanism, Robot, Fuzzy PID Control, Union Simulation

---

# 基于ADAMS和MATLAB的Stewart并联机器人模糊自适应PID控制仿真

樊雍超, 李跃松, 于群, 聂源, 王帅, 李乃强

河南科技大学机电工程学院, 河南 洛阳  
Email: [liyaosong707@163.com](mailto:liyaosong707@163.com)

收稿日期: 2015年8月10日; 录用日期: 2015年8月31日; 发布日期: 2015年9月4日

## 摘要

为降低模型建立的难度,本文基于ADAMS建立了六自由度Stewart并联机构模型,并在模糊PID控制理论的基础上建立了模糊PID控制器的Simulink控制方框图,运用联合仿真技术对Stewart并联机器人位置的模糊PID控制性能进行仿真。通过研究得出,从最低升到最高处的阶跃响应的峰值响应时间约为0.25 s,稳态误差小于0.01 m,其控制器比例系数在衰减后上升,最后稳定在2.68附近,积分参数起时为0,在0.05 s时迅速上升,最后稳定在0.08附近。

## 关键词

Stewart并联机构, 机器人, 模糊PID控制, 联合仿真

## 1. 引言

由上、下两个平台和六个可伸缩的支腿通过运动副连接而成的具有六自由度运动能力且能够模拟空间各种位姿运动的Stewart并联机构最初被设计用作飞行员的飞行模拟器[1]。由于这种机构与传统的串联机构相比具有精度高、刚度大、结构稳定、承载能力强、运动惯量小、动态特性好、反解易获得等优点,其逐渐在航空航天、天文观测、汽车工业、隔振平台、高档数控机床以及起重运载等领域中得到广泛的应用[2] [3]。

由于在具体应用中涉及机械、电机(或液压)驱动、控制、传感等多学科再加上其运动学正解的多解性,使得Stewart并联机构在仿真建模和实际应用中并不容易。特别是在对Stewart平台结构设计和控制器设计时,需要对平台相关的运动学、动力学参数进行计算,以此来为结构设计提供理论依据。而在运动学、动力学参数计算过程中存在大量的数值计算和矩阵计算,形式繁琐且容易出错,不利于工程实际应用[4] [5]。为了解决这个问题,本文采用ADAMS建立Stewart并联机构的模型,基于MATLAB建立模糊PID控制器模型,通过联合仿真对Stewart并联机器人的控制参数进行整定,对其性能进行仿真设计,此种方法由于基于商用软件,因此具有简单、不涉及复杂的理论和公式的优点[6]-[9]。

## 2. Stewart 并联机构

Stewart并联机构如图1所示,其由动平台、静平台、球铰和六个伸缩缸构成,伸缩缸可以是液压缸也可以是电动伸缩缸,其下端通过球铰和静平台相连,上端通过球铰和动平台相连。

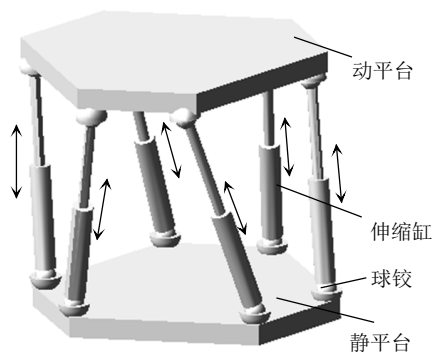


Figure 1. Schematic diagram of Stewart parallel robot

图 1. Stewart 并联机构原理简图

将 Stewart 并联机构作为机器人操作的机器系统即为 Stewart 并联机器人。由于伸缩缸两端为球铰，对伸缩缸的输出杆长度进行控制即可控制动平台的姿态，而伸缩缸是由电机或液压带动的，由于电机或液压的伺服驱动技术较成熟且响应时间远小于机器人的响应时间[10]，因此本文建模时将电机或液压等效于比例环节，仅对 Stewart 并联机器人的控制性能分析。

### 3. Stewart 并联机器人控制模型

#### 3.1. Stewart 并联机构的动力学模型

在工作过程中，平台的受力都集中在动平台上，忽略伸缩缸的质量后，系统的动能可以表示为

$$E = \frac{1}{2} (m \mathbf{V}^T \mathbf{V} + \boldsymbol{\omega}^T \{I\} \boldsymbol{\omega}) \quad (1)$$

式中， $\mathbf{V}$ ， $\boldsymbol{\omega}$  分别是动平台的速度矢量和角速度矢量，因此其取值为

$$\mathbf{V} = \{v_x, v_y, v_z\}^T, \quad \boldsymbol{\omega} = \{\omega_x, \omega_y, \omega_z\}^T \quad (2)$$

$m$ ， $\{I\}$  分别是动平台的质量和惯性张量，惯性张量取值为[11]

$$\{I\} = \begin{bmatrix} I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (3)$$

动平台的动能还可以表示成以下形式

$$E = \mathbf{p}^T [I_s] \mathbf{p} \quad (4)$$

式中， $[I_s]$  为广义惯性张量，它是机构本身的力学量，其取值为

$$[I_s] = \begin{bmatrix} [M_c] & [0]_{3 \times 3} \\ [0]_{3 \times 3} & [I] \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中，

$$[M_c] = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & m \end{bmatrix} \quad (6)$$

$\mathbf{p}$  为动平台的广义输出速度，其表示为

$$\mathbf{p} = \{v_x, v_y, v_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z\} \quad (7)$$

动平台的广义惯性力可以表示为

$$\mathbf{F}_I = -[I_s] \mathbf{p} - \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \boldsymbol{\omega} & [I_c^0] & \boldsymbol{\omega} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中， $\boldsymbol{\omega}$  为动平台的角速度反对称矩阵，它可以表示为

$$\boldsymbol{\omega} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

设动平台不受外力则所受总力等于广义惯性力，即  $\mathbf{F} = \mathbf{F}_I$ 。

由能量守恒可得伸缩缸满足方程

$$F^T p + f^T v_s = 0 \tag{10}$$

式中， $f$ 、 $v_s$  分别为 6 个伸缩缸的驱动力和速度。

由于伸缩缸的速度满足

$$v_s = [A]p \tag{11}$$

则代入式(10)可得

$$F^T + f^T [A] = 0 \tag{12}$$

因此伸缩缸受力满足

$$f^T = -[A^{-1}]F^T \tag{13}$$

式中， $[A]$  为并联平台的一阶影响系数，当已知并联平台上平台的运动状态和受力状态时，就可以求出 6 个伸缩缸的受力情况。

### 3.2. 基于 ADAMS 的 Stewart 机构模型

设动平台直径为 200 mm，静平台直径为 400 mm，伸缩缸由伸缩杆和缸体构成，伸缩杆长度 2 m，直径 50 mm，缸体长度 1.5 mm，内径 50 mm，外径 80 mm，杆件材料为 Q235A，在 ADAMS 中直接构建 Stewart 平台的机械结构模型如图 2 所示。并按如下设置 Stewart 并联机构的约束和运动副：输出杆和缸体间为移动副，伸缩杆和动平台间为球铰连接，缸体和静平台间为球铰连接，静平台为固定架。

### 3.3. 模糊 PID 控制

由于并联机器人存在着非线性、时变性等不确定性因素，传统 PID 控制效果将难以达到预期的目标，采用模糊 PID 控制将能够很好的处理这个问题，模糊 PID 的参数整定原理如图 3 所示[12]，被控对象是 Stewart 并联机构。

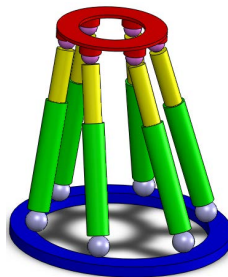


Figure 2. Three-dimensional model of Stewart parallel robot  
图 2. Stewart 并联机构三维模型

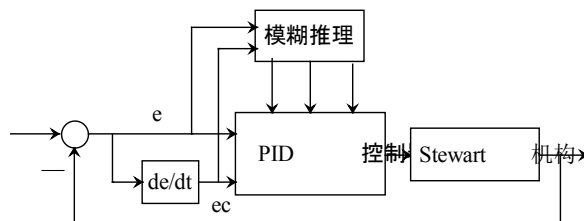


Figure 3. Stewart parallel robot system with fuzzy self-tuning PID controller  
图 3. Stewart 并联机构模糊自适应控制系统

模糊自适应 PID 控制器设计如下:

1) 定义输入、输出模糊集并确定个数类别

依据模糊 PID 控制器的控制规律以及经典 PID 的控制方法, 同时兼顾控制精度。一般将输入的误差 ( $e$ )和误差微分( $ec$ )分为 7 个模糊集: NB (负大), NM (负中), NS (负小), ZO (零), PS (正小), PM (正中), PB (正大)。但为提高系统的响应特性, 取 3 个模糊集 N (负), Z (零), P (正), 因此本文模糊控制集取

$$e, ec = \{N, Z, P\} \quad (14)$$

输出的  $\Delta K_p$ ,  $\Delta K_D$ ,  $\Delta K_i$  也分为 7 个模糊集: NB (负大), NM (负中), NS (负小), ZO (零), PS (正小), PM (正中), PB (正大)。同样取 3 个模糊集

$$\Delta K_p, \Delta K_d, \Delta K_i = \{N, Z, P\} \quad (15)$$

2) 确定输入输出变量的实际论域

根据控制要求, 对各个输入, 输出变量作如下划定:

$$e, ec = \{-3, 0, 3\} \quad (16)$$

$\Delta K_p$ ,  $\Delta K_D$ ,  $\Delta K_i$  的论域:  $\{-0.01, 0, 0.01\}$

应用模糊合成推理 PID 参数的整定算法。第  $k$  个采样时间的整定为

$$\begin{cases} K_p = K_{p0} + \Delta K_p \\ K_i = K_{i0} + \Delta K_i \\ K_D = K_{D0} + \Delta K_D \end{cases} \quad (17)$$

式中,  $K_{p0}$ ,  $K_{i0}$ ,  $K_{D0}$  为经典 PID 控制器的初始参数。

为了便于系统输入, 输出参数映射到论域内。根据实验和相关文献, 确定模糊化因子为:  $ke = kec = 0.01$ ; 解模糊因子为:  $K_1 = 0.5, K_2 = K_3 = 0.01$ 。

3) 定义输入、输出的隶属函数

误差  $e$ 、误差微分及控制量的模糊集和论域确定后, 需对模糊变量确定隶属函数。即对模糊变量赋值, 确定论域内元素对模糊变量的隶属度。参考输入、输出变量的变化规律, 最终作如下规定: 对于输入量误差( $e$ ), 误差微分( $ec$ )都采用高斯型的隶属函数

$$f(x, \sigma, c) = e^{-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}} \quad (18)$$

式中,  $c$  决定函数的中心位置,  $\sigma$  决定函数曲线的宽度。

对于输出量  $K_p$  变化量( $\Delta K_p$ ),  $K_D$  变化量( $\Delta K_D$ ),  $K_i$  变化量( $\Delta K_i$ )采用三角形隶属函数

$$f(x, a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & x \geq c \end{cases} \quad (19)$$

式中,  $a \leq b \leq c$

4) 确定相关模糊规则并建立模糊控制规则表

根据参数  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_D$  对系统输出特性的影响情况, 可以归纳出系统在被控过程中对于不同的偏差和偏差变化率参数  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_D$  的自整定原则:

- 当偏差较大时, 为了加快系统的响应速度, 并防止开始时偏差的瞬间变大可能引起的微分过饱和而使控制作用超出许可范围, 应取较大的  $K_P$  和较小的  $K_D$ 。另外为防止积分饱和, 避免系统响应较大的超调,  $K_I$  值要小, 一般取  $K_I = 0$ 。
- 当偏差和变化率为中等大小时, 为了使系统响应的超调量减小和保证一定的响应速度,  $K_P$  应取小些。在这种情况下  $K_D$  的取值对系统影响很大, 应取小一些,  $K_I$  的取值要适当。
- 当偏差变化较小时, 为了使系统具有较好的稳态性能, 应增大  $K_P$ 、 $K_I$  值, 同时为避免输出响应在设定值附近振荡, 以及考虑系统的抗干扰能力, 应适当选取  $K_D$ 。原则是: 当偏差变化率较小时,  $K_D$  取大一些; 当偏差变化率较大时,  $K_D$  取较小的值, 通常为中等大小。

参考以上自整定原则, 总结工程设计人员的技术知识和实际操作经验, 建立合适的关于  $e$ 、 $ec$ 、 $\Delta K_P$ 、 $\Delta K_I$  的模糊规则推理表如表 1 和表 2 所示。

由于微分的作用是改善系统的动态性能, 对偏差进行提前预报, 但微分作用强会使得响应过程提前制动, 降低系统的抗干扰性能, 延长调节时间, 考虑到所研究 Stewart 并联机器人对精度、抗干扰性能要求很高, 因此本文仅对 PI 参数进行整定。

依据图 3 可建立基于 simulink 的模糊自适应 PID 控制器如图 4 所示。

## 4. Stewart 并联机器人控制仿真

### 4.1. Stewart 并联机器人的控制

由前所述, 伺服电机的响应速度远大于 Stewart 并联机器人的响应速度。在建模时将电机模型等效成比例环节, 模糊 PID 控制器控制对象为 Stewart 并联机器人最终位置。为研究方便, 本文选用 Stewart 并联机器人 Z 方向位置(升降方向)作为控制对象, 结合图 2 和图 4 可建立 Stewart 并联机器人的位置控制模型如图 5 所示。

图 5 中与 Admas 联合的前端模块为运动学反解模块, 通过数值模拟确定机器人每个位置所对应角度。

### 4.2. Stewart 并联机器人的模糊自适应控制仿真

设 PI 控制参数的初始值为分别为

$$K_{p0} = 2.68, K_{i0} = 0.08 \quad (20)$$

基于图 5 建立的 Stewart 并联机器人模糊自适应 PID 控制系统仿真可得, 在 Z 方向的阶跃响应曲线如图 6 所示。模糊自适应 PID 控制器的参数整定过程如图 7 所示。

设伸缩缸最短时 Stewart 并联机器人位置为零位。由图 6 可知, 在 Stewart 并联机器人从  $Z = 0$  跃变到  $z = 1 \text{ m}$  的高度时, 在模糊自适应 PID 控制器的作用下, 其阶跃响应的峰值响应时间约为  $0.25 \text{ s}$ , 稳态误差小于  $0.01 \text{ m}$ ; 在传统 PI 控制器作用下, 阶跃响应曲线的上升时间约为  $0.5 \text{ s}$ , 稳态时间约为  $0.6 \text{ s}$ 。因此模糊自适应 PID 控制器可以提高 Stewart 并联机器人位置控制性能。

图 7 为模糊 PID 控制参数随时间的变化曲线, 由图 7(a)可知比例系数在衰减后上升, 最后稳定在 2.68 附近, 由图 7(b)可知积分参数迅速将为 0, 在  $0.05 \text{ s}$  时迅速上升, 最后稳定在 0.08 附近。

## 5. 结论

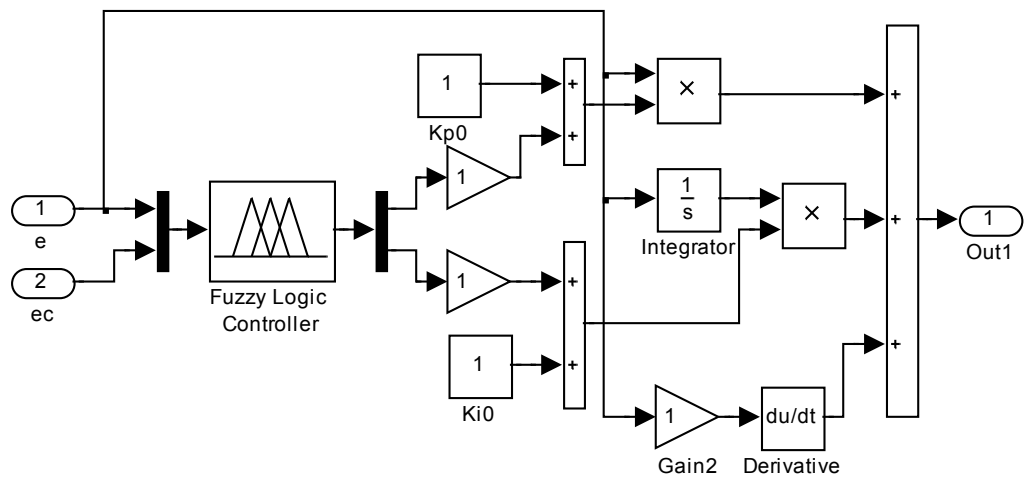
通过 ADAMS 建立 Stewart 并联机构模型和 Simulink 建立的模糊 PID 控制器联合仿真对 Stewart 并联机器人的控制性能进行了研究, 在 Stewart 并联机器人从最低状态跃变到最高状态时, 所给 Stewart 并联机器人的峰值响应时间约为  $0.25 \text{ s}$ , 稳态误差小于  $0.01 \text{ m}$ ; 其模糊 PID 控制器的比例系数在衰减后上升, 最后稳定在 2.68 附近, 积分参数迅速将为 0, 在  $0.05 \text{ s}$  时迅速上升, 最后稳定在 0.08 附近。

**Table 1.** The value of proportion parameter  
**表 1.** 比例参数取值的模糊规则表

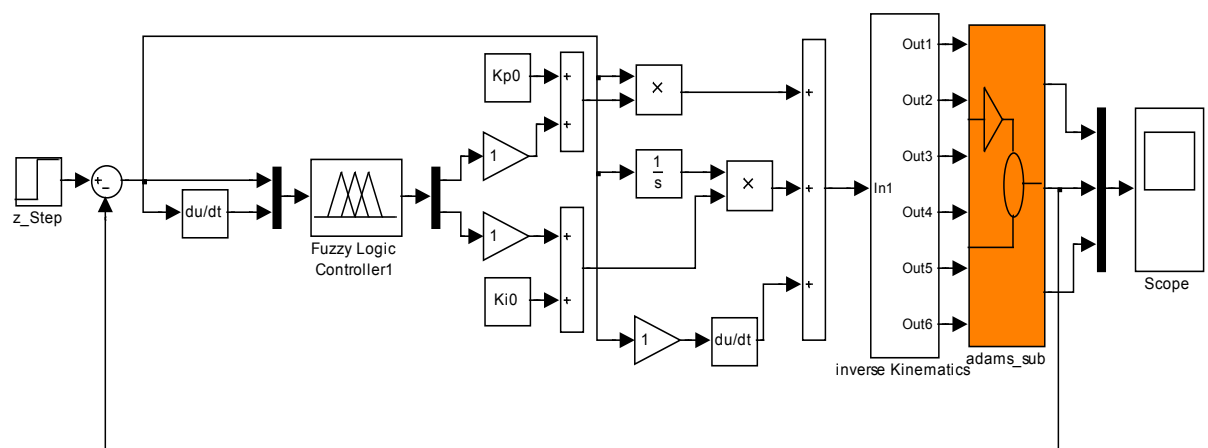
$e \backslash ec$	$N$	$Z$	$P$
$N$	$N$	$N$	$N$
$Z$	$N$	$P$	$P$
$P$	$P$	$P$	$P$

**Table 2.** The value of integral parameter  
**表 2.** 积分参数取值模糊规则表

$e \backslash ec$	$N$	$Z$	$P$
$N$	$Z$	$Z$	$Z$
$Z$	$P$	$P$	$P$
$P$	$Z$	$Z$	$Z$



**Figure 4.** Fuzzy self-tuning PID controller  
**图 4.** 模糊自适应 PID 控制器



**Figure 5.** Simulation figure of Stewart parallel robot system with fuzzy self-tuning PID controller  
**图 5.** Stewart 并联机器人的模糊自适应 PID 控制系统仿真图

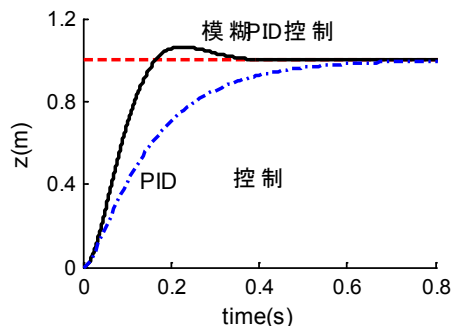


Figure 6. Step response of Stewart parallel robot  
图 6. Stewart 并联机器人的阶跃响应曲线

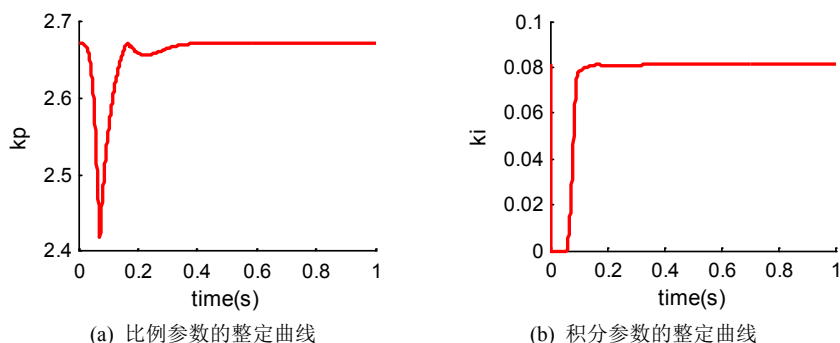


Figure 7. Parameter of Stewart parallel robot with fuzzy self-tuning PID controller  
图 7. 模糊自适应 PID 控制的参数自整定过程

## 致 谢

本文由河南科技大学博士科研启动费(4001-13480055), 河南科技大学青年科学基金(2015QN013), 河南科技大学 2015 年度大学生研究训练计划(2015006)资助。

## 参考文献 (References)

- [1] 徐鹏 (2005) 六自由度并联机构 Stewart 平台的动力学建模与仿真. 重庆大学, 重庆.
- [2] 李团结 (2009) 机器人技术. 电子工业出版社, 北京.
- [3] 杨达毅, 陈丽敏 (2008) 基于 Solidworks 的六自由度液压平台运动仿真. *机床与液压*, **9**, 127-150.
- [4] 陈丽 (2004) Stewart 平台 6-DOF 并联机器人完整动力学模型的建立. *燕山大学学报*, **3**, 228-232.
- [5] Bandyopadhyay, S. and Ghosal, A. (2006) Geometric characterization and parametric representation of the singularity manifold of a 6-6 Stewart platform manipulator. *Mechanism and Machine Theory*, **41**, 1377-1400. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2005.12.006>
- [6] 姚丽君, 李成刚, 张军 (2012) ADAMS 与 MATLAB 联合仿真在 3 自由度并联机构控制中的应用. *机械设计*, **5**, 31-34.
- [7] 王涛, 张会明 (2005) 基于 ADAMS 与 MATLAB 的联合控制系统的仿真. *机械工程与自动化*, **3**, 79-81.
- [8] Li, H.D., Gosselin, C.M. and Richard, M.J. (2007) Determination of the maximal singularity-free zones in the six-dimensional workspace of the general Gough-Stewart platform. *Mechanism and Machine Theory*, **42**, 497-511. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2006.04.006>
- [9] 王战中, 杨长建, 刘超颖 (2013) 基于 MATLAB 和 ADAMS 的六自由度机器人联合仿真. *制造业自动化*, **9**, 31-33.
- [10] Li, H.D., Gosselin, C.M., Richard, M.J., et al. (2006) Analytic form of the six-dimensional singularity locus of the general Gough-Stewart platform. *ASME Journal of Mechanical Design*, **128**, 279-287.



---

<http://dx.doi.org/10.1115/1.2118733>

- [11] 刘磊, 王萍萍, 孔宪仁, 等 (2011) Stewart 平台动力学建模及鲁棒主动隔振控制. *宇航学报*, **6**, 1231-1237.
- [12] 殷小平, 刘玉绒, 吴海丹, 等 (2008) 一种模糊自整定 PID 复合控制在非对称液压缸电液伺服系统中的应用. *机床与液压*, **10**, 10-15