

3-U^rSR 6 自由度并联机构位置分析*

虞启凯^{1,2} 游有鹏¹ 韩江义³

(1. 南京航空航天大学江苏省精密与微细制造技术重点实验室, 南京 210016;
2. 南京化工职业技术学院机械系, 南京 210048; 3. 江苏大学汽车与交通工程学院, 镇江 212013)

【摘要】 提出一种采用球面 2 自由度五杆作为驱动装置的 3-U^rSR 并联机构。对该机构自由度进行了计算, 对机构的位置反解进行了分析和研究, 并列出了正解的约束方程组。最后用反解验证了正解的正确性, 给出了该机构的位姿分析的数值仿真实例及图形。

关键词: 并联机构 6 自由度 位置正反解 空间分析
中图分类号: TH112 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)12-0215-05

Position Analysis of 3-U^rSR Parallel Mechanism with 6-DOF

Yu Qikai^{1,2} You Youpeng¹ Han Jiangyi³

(1. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Precision and Micro-manufacturing Technology,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China
2. Mechanical Department, Nanjing College of Chemical Technology, Nanjing 210048, China
3. School of Automobile and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract

A parallel mechanism named 3-U^rSR was proposed. It used 2-DOF spherical five-bar mechanism as the compound drive device. The mechanism freedoms were calculated, and the mechanism inverse solution was analyzed. The equations of forward solutions to positions were established. At last, the results of forward solutions was numerical verified by inverse solutions, and the simulation example and figure of mechanism positional posture numerical were given.

Key words Parallel mechanism, 6-DOF, Position forward and inverse solutions, Workspace analysis

引言

并联机构具有刚度较大、结构稳定、误差小、精度高、易于实现高速运动和结构简单等优点, 近年来, 并联机构的研究有了很大进步^[1], 多种新型并联机构被应用, 如基于 Stewart 平台^[2]的六杆系 6 自由度并联机构的改进机构、飞行模拟器^[3]、并联机床^[4]、微操作手^[5]、带球绞的并联机构^[6-7]; Lee^[8]等研究了用矢量几何和欧拉角来转换运动学与几何学的关系; 另外还有空间 3 自由度并联机构, 如 3-PUU^[9]、3-PSS^[10]等运动形式的平台机构; 也有研

究空间多自由度的并联机构, 如 3-U^rRS^[11] 6 自由度并联机构, 这些都是近年来出现的在扩大自由度、扩大工作空间、简化机构等方面作出较大改进的研究。本文提出一种 3 支链 6 自由度 3-U^rSR 的并联机构。

1 机构描述

本文提出的三维空间任意运动的并联机构为 3-U^rSR 型机构, 图 1 是该机构 CAD 模型, 由动平台、静平台及 3 条支链组成。图 2 所示为该并联机构简图, 设动、静平台形心分别为 O_p 、 O_b ; 动、静平台

收稿日期: 2011-03-16 修回日期: 2011-04-01
* 国家自然科学基金资助项目(50975144)
作者简介: 虞启凯, 博士生, 南京化工职业技术学院讲师, 主要从事微机电系统研究, E-mail: yuqikai@163.com
通讯作者: 游有鹏, 教授, 博士生导师, 主要从事机械电子工程和微机电系统研究, E-mail: youypeng@163.com

之间通过3条支链连接,每条支链由2个构件 A_iB_i 、 B_iC_i 分别通过一个球面2自由度机构 U^r 和一个球面(S)副和一个转动(R)副连接而成,其中 C_i 处的转动(R)副互相平行($i=1,2,3$);另外 A_i 处的 U 副见图2和图3;动、静平台上 O_pC_i 和 O_bA_i 分别互呈 120° ,用 α_i 表示,当 $i=1$ 时, $\alpha=0$;当 $i=2$ 时, $\alpha=2\pi/3$;当 $i=3$ 时, $\alpha=-2\pi/3$ 。如图1所示,在静平台上建立定坐标系 $O_bX_bY_bZ_b$, X_b 轴指向 A_i , Z_b 轴垂直于静平台指向动平台;动平台上建立动坐标系 $O_pX_pY_pZ_p$, X_p 轴指向 C_i , Z_p 轴垂直于动平台平面向上; A_i 处结构如图3所示,具有2个自由度,在 A_i 建立静、动坐标系,分别为 $O_mX_mY_mZ_m$ 和 $A_iX_iY_iZ_i$ 。

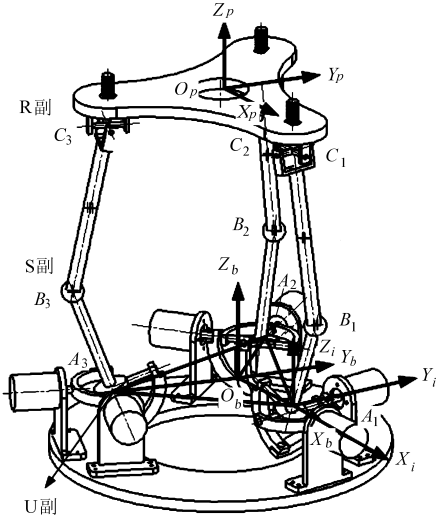


图1 3-U^rSR型机构的CAD模型
Fig. 1 CAD model of 3-U^rSR

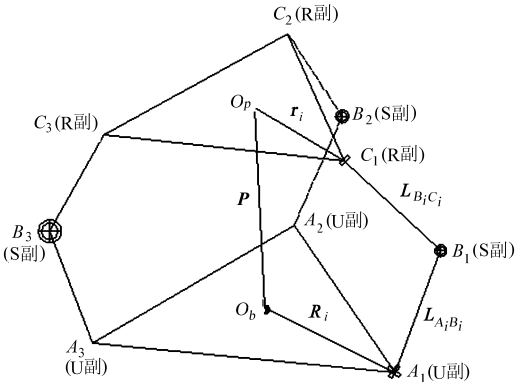


图2 机构简图
Fig. 2 Mechanism sketch

2 机构自由度计算

该机构由 A_iB_i 、 B_iC_i 两杆件与动平台连接,共有构件数 $n=8$,运动副数目 $g=9$,其中R副3个,S副3个, U^r 机构3个;由自由度公式^[3] $F=(n-g-1)+\sum_{i=1}^g f_i$,可求出机构的总自由度;其中 f_i 为第 i 个运

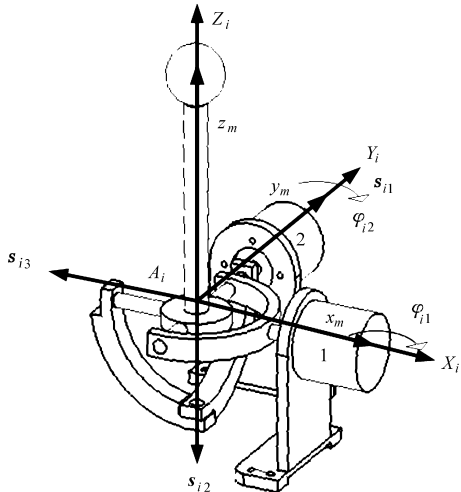


图3 U^r 机构的结构及对应向量
Fig. 3 Structure of U^r pair and correspondence vector

动副的自由度。由机构知: $F=6$ 。由此计算结果及其结构特点知该机构可以实现三维空间的任意运动,即本机构需要选择6个主动副,根据主动副选定原则,选择 U^r 机构 A_i ($i=1,2,3$)处的6个转动副为主动副,并刚化之,这时机构的总自由度 $F=0$,满足主动副存在原则。

3 空间位置分析

3.1 位置正解

设 C_1 点坐标为 $(x_{c_1}, y_{c_1}, z_{c_1})$, C_2 点坐标为 $(x_{c_2}, y_{c_2}, z_{c_2})$, C_3 点坐标为 $(x_{c_3}, y_{c_3}, z_{c_3})$, B_1 点坐标为 $(x_{B_1}, y_{B_1}, z_{B_1})$, B_2 点坐标为 $(x_{B_2}, y_{B_2}, z_{B_2})$, B_3 点坐标为 $(x_{B_3}, y_{B_3}, z_{B_3})$, O_p 点坐标为 (p_x, p_y, p_z) ,构件 A_iB_i 绕 X_i 轴旋转角度 φ_{i1} ,绕 Y_i 轴旋转角度 φ_{i2} 如图3所示。设机构静、动平台的形心到 A_i 、 C_i 的距离分别为 R, r ,矢量分别为 R_i, r_i ,杆 A_iB_i 、 B_iC_i 长度分别为 l_1, l_2 ,矢量分别为 $L_{A_iB_i}, L_{B_iC_i}$ ($i=1,2,3$),动平台形心 O_p 的坐标向量 P ; s_{i1}, s_{i2} 分别为 $Y_i, -Z_i$ 的单位矢量,如图2、3可知,当电动机1绕 X_i 轴旋转角度 φ_{i1} 时, $s_{i1}=(0, \cos\varphi_{i1}, \sin\varphi_{i1})$,当电动机2绕 Y_i 轴旋转角度 φ_{i2} 时, $s_{i2}=(-\sin\varphi_{i2}, 0, -\cos\varphi_{i2})$,设: $s'_{i3}=s_{i1} \times s_{i2}$,而 $s_{i3}=s'_{i3}/d$ 为 s'_{i3} 的单位矢量,其中 $d=\|s_{i1} \times s_{i2}\|=\sqrt{1-\sin^2\varphi_{i1}\cos^2\varphi_{i2}}$,令: $x_m=-s_{i3}, y_m=s_{i1}$,而 $z_m=-s_{i3} \times s_{i1}/e, e=\|s_{i3} \times s_{i1}\|=1$ 。得到

$${}^b_mR=R_2=[x_m \quad y_m \quad z_m]=\begin{bmatrix} \cos\varphi_{i1}\cos\varphi_{i2}/d & 0 & \sin\varphi_{i2}/d \\ \sin\varphi_{i1}\sin\varphi_{i2}/d & \cos\varphi_{i1} & -\sin\varphi_{i1}\cos\varphi_{i1}\cos\varphi_{i2}/d \\ -\cos\varphi_{i1}\sin\varphi_{i2}/d & \sin\varphi_{i1} & \cos^2\varphi_{i1}\cos\varphi_{i2}/d \end{bmatrix}$$

则 B_i 点坐标为

$$B_i = L_{A_i B_i} + R_i = \begin{bmatrix} l_1 \cos \alpha_i \sin \varphi_{i2}/d + l_1 \sin \alpha_i \sin \varphi_{i1} \cos \varphi_{i1} \cos \varphi_{i2}/d + R \cos \alpha_i \\ l_1 \sin \alpha_i \sin \varphi_{i2}/d - l_1 \cos \alpha_i \sin \varphi_{i1} \cos \varphi_{i1} \cos \varphi_{i2}/d + R \sin \alpha_i \\ l_1 \cos^2 \varphi_{i1} \cos \varphi_{i2}/d \end{bmatrix}$$

因为矢量 $L_{B_i C_i}$ 的长度为 l_2 , $L_{C_1 C_2}$ 、 $L_{C_1 C_3}$ 、 $L_{C_2 C_3}$ 的长度为 $\sqrt{3}r$, 且 $L_{B_3 C_3} L_{C_1 C_2} = 0$, $L_{B_1 C_1} L_{C_2 C_3} = 0$, $L_{B_2 C_2} L_{C_1 C_3} = 0$, 也即

$$(x_{B_1} - x_{C_1})^2 + (y_{B_1} - y_{C_1})^2 + (z_{B_1} - z_{C_1})^2 = l_2^2 \quad (1)$$

$$(x_{B_2} - x_{C_2})^2 + (y_{B_2} - y_{C_2})^2 + (z_{B_2} - z_{C_2})^2 = l_2^2 \quad (2)$$

$$(x_{B_3} - x_{C_3})^2 + (y_{B_3} - y_{C_3})^2 + (z_{B_3} - z_{C_3})^2 = l_2^2 \quad (3)$$

$$(x_{C_2} - x_{C_3})^2 + (y_{C_2} - y_{C_3})^2 + (z_{C_2} - z_{C_3})^2 = 3r^2 \quad (4)$$

$$(x_{C_1} - x_{C_2})^2 + (y_{C_1} - y_{C_2})^2 + (z_{C_1} - z_{C_2})^2 = 3r^2 \quad (5)$$

$$(x_{C_1} - x_{C_3})^2 + (y_{C_1} - y_{C_3})^2 + (z_{C_1} - z_{C_3})^2 = 3r^2 \quad (6)$$

$$(x_{B_1} - x_{C_1})(x_{C_2} - x_{C_3}) + (y_{B_1} - y_{C_1})(y_{C_2} - y_{C_3}) + (z_{B_1} - z_{C_1})(z_{C_2} - z_{C_3}) = 0 \quad (7)$$

$$(x_{B_3} - x_{C_3})(x_{C_1} - x_{C_2}) + (y_{B_3} - y_{C_3})(y_{C_1} - y_{C_2}) + (z_{B_3} - z_{C_3})(z_{C_1} - z_{C_2}) = 0 \quad (8)$$

$$R^w = \begin{bmatrix} \cos \eta \cos \beta & \cos \eta \sin \beta \sin \psi - \sin \eta \cos \psi & \cos \eta \sin \beta \cos \psi + \sin \eta \sin \psi \\ \sin \eta \cos \beta & \sin \eta \sin \beta \sin \psi + \cos \eta \cos \psi & \sin \eta \sin \beta \cos \psi - \cos \eta \sin \psi \\ -\sin \beta & \cos \beta \sin \psi & \cos \beta \cos \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x \\ n_y & o_y & a_y \\ n_z & o_z & a_z \end{bmatrix}$$

由式(10)可得

$$P + r_i + L_{B_i C_i} = \begin{bmatrix} p_x + r_n \cos \alpha_i + r_o \sin \alpha_i + \sin \theta_i (l_2 n_x \cos \alpha_i + l_2 o_x \sin \alpha_i) - l_2 a_x \cos \theta_i \\ p_y + r_n \cos \alpha_i + r_o \sin \alpha_i + \sin \theta_i (l_2 n_y \cos \alpha_i + l_2 o_y \sin \alpha_i) - l_2 a_y \cos \theta_i \\ p_z + r_n \cos \alpha_i + r_o \sin \alpha_i + \sin \theta_i (l_2 n_z \cos \alpha_i + l_2 o_z \sin \alpha_i) - l_2 a_z \cos \theta_i \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$L_{A_i B_i} + R_i = \begin{bmatrix} l_1 \cos \alpha_i \sin \varphi_{i2}/d + l_1 \sin \alpha_i \sin \varphi_{i1} \cos \varphi_{i1} \cos \varphi_{i2}/d + R \cos \alpha_i \\ l_1 \sin \alpha_i \sin \varphi_{i2}/d - l_1 \cos \alpha_i \sin \varphi_{i1} \cos \varphi_{i1} \cos \varphi_{i2}/d + R \sin \alpha_i \\ l_1 \cos^2 \varphi_{i1} \cos \varphi_{i2}/d \end{bmatrix} \quad (12)$$

式(11)、(12)分别为式(10)的左、右两边,令二者相等且

$$\begin{aligned} m_{11} &= p_x + r_n \cos \alpha_i + r_o \sin \alpha_i + \sin \theta_i (l_2 n_x \cos \alpha_i + l_2 o_x \sin \alpha_i) - l_2 a_x \cos \theta_i - R \cos \alpha_i \\ m_{12} &= l_1 \cos \alpha_i \quad m_{13} = l_1 \sin \alpha_i \\ m_{21} &= p_y + r_n \cos \alpha_i + r_o \sin \alpha_i + \sin \theta_i (l_2 n_y \cos \alpha_i + l_2 o_y \sin \alpha_i) - l_2 a_y \cos \theta_i - R \sin \alpha_i \\ m_{31} &= p_z + r_n \cos \alpha_i + r_o \sin \alpha_i + \sin \theta_i (l_2 n_z \cos \alpha_i + l_2 o_z \sin \alpha_i) - l_2 a_z \cos \theta_i \end{aligned}$$

$$l_1 = \sqrt{(k_1 + k_2 \sin \theta_i + k_3 \cos \theta_i)^2 + (k_4 + k_5 \sin \theta_i + k_6 \cos \theta_i)^2 + (k_7 + k_8 \sin \theta_i + k_9 \cos \theta_i)^2}$$

$$\text{也即 } 2 \cos \theta_i (k_1 k_3 + k_4 k_6 + k_7 k_9) + 2 \sin \theta_i (k_2 k_1 + k_5 k_4 + k_8 k_7) = -(k_1^2 + k_4^2 + k_7^2 - l_1^2 + l_2^2)$$

$$\text{令 } a = 2(k_1 k_3 + k_4 k_6 + k_7 k_9), b = 2(k_2 k_1 + k_5 k_4 + k_8 k_7), c = -(k_1^2 + k_4^2 + k_7^2 - l_1^2 + l_2^2), \text{可得}$$

$$\theta_i = \text{atan2}(b, a) + \text{atan2}(\pm \sqrt{a^2 + b^2 - c^2}, c) \quad (15)$$

$$(x_{B_2} - x_{C_2})(x_{C_1} - x_{C_3}) + (y_{B_2} - y_{C_2})(y_{C_1} - y_{C_3}) + (z_{B_2} - z_{C_2})(z_{C_1} - z_{C_3}) = 0 \quad (9)$$

由式(1)~(9)就可以求出 9 个未知数: x_{C_1} 、

y_{C_1} 、 z_{C_1} 、 x_{C_2} 、 y_{C_2} 、 z_{C_2} 、 x_{C_3} 、 y_{C_3} 和 z_{C_3} , 非线性方程可以采用数值分析的方法来求解。

3.2 位置反解

设动平台形心 O_p 的坐标向量为 P , 动平台绕 X 、 Y 、 Z 轴旋转的 3 个旋转角分别为 η 、 β 、 ψ , 旋转矩阵 R^w , C 点的旋转角度为 θ_i 。

由单支链机构的位姿矢量关系可得

$$P + r_i + L_{B_i C_i} = R_i + L_{A_i B_i} \quad (10)$$

其中

$$P = (p_x, p_y, p_z)$$

$$r_i = (r \cos \alpha_i, r \sin \alpha_i, 0)$$

$$R_i = (R \cos \alpha_i, R \sin \alpha_i, 0)$$

整理得到

$$\varphi_{i1} = \text{atan2}(m_{11} \sin \alpha_i - m_{21} \cos \alpha_i, m_{31}) \quad (13)$$

$$\varphi_{i2} = \text{atan2}(m_{31}, \cos^2 \varphi_{i1} (m_{11} \cos \alpha_i + m_{21} \sin \alpha_i)) \quad (14)$$

因为 $L_{A_i B_i}$ 长度为 l_1 , 令 $k_1 = p_x + r_n \cos \alpha_i + r_o \sin \alpha_i - R \cos \alpha_i$, $k_2 = l_2 n_x \cos \alpha_i + l_2 o_x \sin \alpha_i$, $k_3 = -l_2 a_x$, $k_4 = p_y + r_n \cos \alpha_i + r_o \sin \alpha_i - R \sin \alpha_i$, $k_5 = l_2 n_y \cos \alpha_i + l_2 o_y \sin \alpha_i$, $k_6 = -l_2 a_y$, $k_7 = p_z + r_n \cos \alpha_i + r_o \sin \alpha_i - R \cos \alpha_i$, $k_8 = l_2 n_z \cos \alpha_i + l_2 o_z \sin \alpha_i$, $k_9 = -l_2 a_z$, 可得到

4 运动学反解算例

为了验证位置反解的正确性,通过算例来观察输入和输出的对应关系。对于每组给定的结构参数值,由于每个 θ_i 都有两种结果,将得出 8 种不同的驱动组合方式,在理论上都是合理组

合。下面利用两种不同的结构参数组进行位置反解计算。

已知机构的结构参数 $R = 80\text{ mm}$ 、 $r = 60\text{ mm}$ 、 $l_1 = 80\text{ mm}$ 、 $l_2 = 80\text{ mm}$ ，动平台中心坐标为 $P = (0, 0, 100)$ ；动平台绕 X 、 Y 、 Z 轴旋转的 3 个欧拉角分别为 $\eta = 0$ 、 $\beta = 0$ 、 $\psi = \pi/6$ 。

经过反解求解过程，最后由式(13)~(15)得到两组解，分别为

$$\begin{cases} \theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = 0.849\ 0 \\ \varphi_{11} = \varphi_{21} = \varphi_{31} = -0.905\ 0 \\ \varphi_{12} = \varphi_{22} = \varphi_{32} = 0.191\ 6 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = -0.663\ 9 \\ \varphi_{11} = \varphi_{21} = \varphi_{31} = -0.143\ 7 \\ \varphi_{12} = \varphi_{22} = \varphi_{32} = -1.080\ 3 \end{cases}$$

通过上面位置反解公式可求得 8 种不同组合解，如图 4 所示。

用反解来验证正解过程，取其中一组验证 $\theta_i = 0.849\ 0$ 、 $\varphi_{i1} = -0.905\ 0$ 、 $\varphi_{i2} = 0.191\ 6$ ，获得 B 点坐标，代入式(1)~(9)可得 9 个未知数，分别为 $x_{c_1} = 51.961\ 5$ 、 $y_{c_1} = 30$ 、 $z_{c_1} = 100$ 、 $x_{c_2} = -51.961\ 5$ 、 $y_{c_2} = 30$ 、 $z_{c_2} = 100$ 、 $x_{c_3} = -3.552\ 7 \times 10^{-14}$ 、 $y_{c_3} = -60$ 和 $z_{c_3} = 100$ ；得出与反解的值一致。

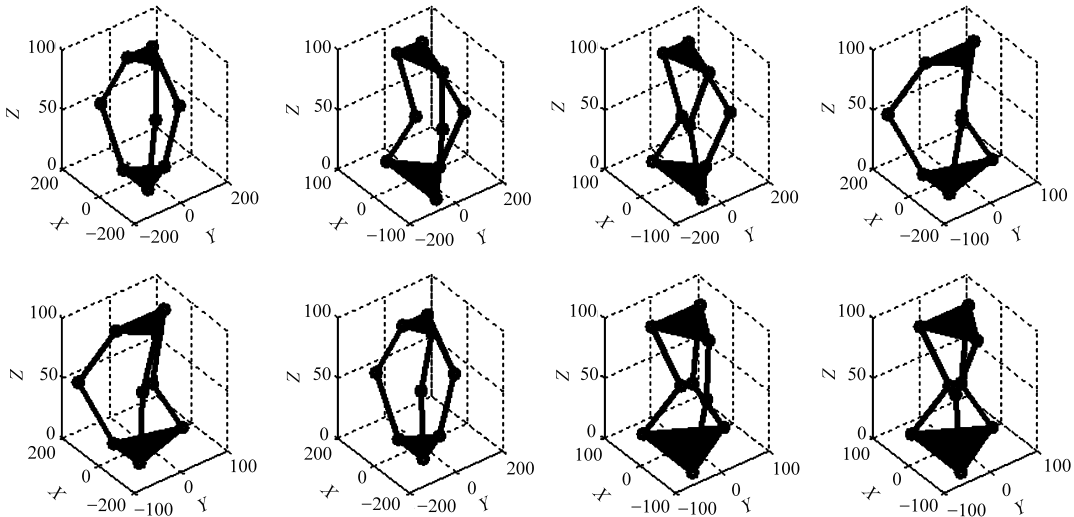


图 4 8 组解对应的动平台位姿
Fig. 4 Move platforms of eight correspondence solutions

5 结论

(1)提出了 3-U^rSR 平台机构，6 个自由度平均分配在 3 个支链上，减少了各个杆件之间的干涉，改善了机构的灵活度差的问题，增大了工作空间。

(2)得出了正解的封闭解形式。
(3)利用数值方法对机构的正反解进行了验证：根据反解得出空间 1 个点对应 2 个 θ_i ，而 θ_i 与 φ_{i2} 、 φ_{i1} 不同组合就可以得到 8 组不同的解，同时用数值方法求出正解与反解一致，验证了正反解的正确性。

参 考 文 献

1 高峰. 机构学研究现状与发展趋势的思考[J]. 机械工程学报, 2005, 41(8): 3~17.
Gao Feng. Reflection on the current status and development strategy of mechanism research [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(8): 3~17. (in Chinese)

2 Stewart D. A platform with six degrees of freedom[J]. Proceedings of Institution of Mechanical Engineerings, 1965, 180: 371~386.

3 Salcudean S E, Drexel P A, Ben-Dov D, et al. A six degree-of-freedom, hydraulic, one person motion simulator[C]//IEEE Conference on Robotics and Automation, 1994: 2 437~2 443.

4 Chen S L, Chang T H, Hsei M H. Analytical modelling of manufacturing errors on the accuracy for TRR-XY hybrid parallel link machine tool[J]. Proc. IMech. E., Part B: J. Engineering Manufacture, 2001, 215(9): 1 203~1 216.

5 Valenti M. Machine tools get smarter[J]. ASME Mech. Engng., 1995, 117(11): 70~75.

6 Jinwook K, Park F C. Direct kinematic analysis of 3-RS parallel mechanisms[J]. Mechanism and Machine Theory, 2001, 36(10): 1 121~1 134.

7 Xianwen K, Gosselin C M. Forward displacement analysis of third-class analytic 3-RPR planar parallel manipulators[J]. Mechanism and Machine Theory, 2001, 36(9): 1 009~1 018.

- 8 Lee K M, Shah D K. Kinematic analysis of a three-degrees-of-freedom in-parallel actuated manipulator [C] // 1987 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1988, 4(3): 354 ~ 360.
 - 9 吴光中, 李剑锋, 费仁元, 等. 3-PU*U*型平动并联机构的运动学分析[J]. 中国机械工程, 2004, 15(9): 816 ~ 819.
 - 10 胡福生, 郝秀清, 陈建涛. 3PSS 并联机构的运动学分析[J]. 山东理工大学学报: 自然科学版, 2006(1): 47 ~ 50.
 - 11 高征, 高峰. 6 自由度 3-U^rRS 并联机构的位置正解分析[J]. 机械工程学报, 2007, 43(12): 171 ~ 177.
 - 12 韩方元, 赵丁选, 李天宇. 3-RPS 并联机构正解快速数值算法[J]. 农业机械学报, 2011, 42(4): 229 ~ 233.
Han Fangyuan, Zhao Dingxuan, Li Tianyu. A fast forward algorithm for 3-RPS parallel mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(4): 229 ~ 233. (in Chinese)
 - 13 吴鑫, 陈美丽, 张彦斌. 2T1R 并联机构位置及奇异性分析[J]. 农业机械学报, 2010, 41(2): 208 ~ 213.
Wu Xin, Chen Meili, Zhang Yanbin. Analysis of position and singularity of a parallel mechanism with three degrees of freedom[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(2): 208 ~ 213. (in Chinese)
-

(上接第 201 页)

- 11 Li Z W, Chou S K, Shu C, et al. Characteristics of premixed flame in micro-combustors with different diameters [J]. Applied Thermal Engineering, 2005, 25(2 ~ 3): 271 ~ 281.
 - 12 Li Z W, Chou S K, Shu C, et al. Predicting the temperature of a premixed flame in a micro-combustor [J]. Journal of Applied Physics, 2004, 96(19): 3 524 ~ 3 530.
 - 13 高静, 王恒, 苏庆泉, 等. 层流预混火焰传播速度与火焰稳定传播界限的测定[J]. 热能工程, 2009, 38(1): 14 ~ 16.
Gao Jing, Wang Heng, Su Qingquan, et al. Measurements of burning speed and stabilization limits for laminar premixed flames [J]. Thermal Engineering, 2009, 38(1): 14 ~ 16. (in Chinese)
 - 14 王谦, 李德桃, 潘剑锋. 燃烧学[M]. 北京: 中国科学文化出版社, 2002.
 - 15 葛新石, 叶宏. 传热和传质基本理论[M]. 6 版. 北京: 化学工业出版社, 2007.
 - 16 彭晓峰, 张杨. 传热词汇 A-Z (原著《Wärmeübertragung A-Z》)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
-

(上接第 234 页)

- 12 侯东海, 刘忠明, 吴序堂. 用工具斜齿条法加工斜齿非圆齿轮的啮合理论模型[J]. 机械工程学报, 2003, 39(8): 49 ~ 54.
Hou Donghai, Liu Zhongming, Wu Xutang. Meshing theory analysis model for the manufacturing of helical noncircular gear by the helical tooling rack generating method [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(8): 49 ~ 54. (in Chinese)
- 13 胡昌军, 钱瑞明, 史雷. 基于回转车床的正多面体车削及刀尖轨迹仿真[J]. 农业机械学报, 2009, 40(12): 255 ~ 260.
Hu Changjun, Qian Ruiming, Shi Lei. Simulation on regular polygon forming and locus of knife point based on rotary cutting machine tool [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(12): 255 ~ 260. (in Chinese)