新型串并联机构的运动学分析

马春生¹,张俊辕²,尹晓秦¹,李瑞琴¹

(1.中北大学 机械工程学院, 太原 030051; 2. 重庆嘉陵华光电科技有限公司, 重庆 400700)

摘要:目的 为了使柔性化生产线能够快速对不同产品进行生产,缩短对不同机器进行测量的时间,探 究所述机构在工作空间方面作为测量机构的可行性。方法 提出一种具有精度高、测量范围大且同时便 于携带的工业机器人测试平台;主体为串并混联机构,该机构分为上部和下部,下部为 3SPR 并联机构, 上部为 6SPS 并联机构,分析其逆运动学来求出运动学逆解;并通过软件对其工作空间的形状和大小进 行仿真。结果 列出了机构的 9 个运动学逆解公式,获得了工作空间的 18 个极限位置和 30 条边界。 结论 文中所述机构的工作空间体积大,连续无空洞,形状规则而对称;可作为测试平台。

关键词:串并联机构;刚柔复合机构;运动学

中图分类号: TB486; TH112 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2021)13-0241-05 DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.13.033

Kinematic Analysis of New Series-Parallel Mechanism

MA Chun-sheng¹, ZHANG Jun-yuan², YIN Xiao-qin¹, LI Rui-qin¹

(1.School of Mechanical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;2.Chongqing Jialing Huaguang Photoelectric Technology Co., Ltd., Chongqing 400700, China)

ABSTRACT: In order to make the flexible production line quickly produce different products, shorten the measure time of different machines, and to explore the feasibility of the mechanism as a measuring mechanism in the working space, an industrial robot test platform with high precision, large measurement range and portability is proposed. A 3 SPR-6 SPS series-parallel mechanism with multiple degrees of freedom is proposed. The bottom layer of the mechanism is a 3SPR parallel mechanism and the upper part is a 6SPS parallel mechanism. The inverse kinematics analysis of the mechanism is carried out, and then the working space is solved by modeling and simulation with software. Nine inverse kinematics formulas of the mechanism are listed, and 18 limit positions and 30 boundaries of the workspace are obtained. The workspace of the mechanism described in this paper is large in volume, continuous without cavity, regular and symmetrical shape, and it is feasible to be used as a test platform.

KEY WORDS: serial-parallel mechanism; rigid-flexible composite mechanism; kinematic

随着柔性生产线的不断普及^[1-2],需要对机器 臂进行快速的测量,这对测试机构提出了更高的要 求^[3]。并联机构具有优异的性能,越来越多的领域开 始运用并联机器人来辅助人类完成工作。常见的并联 机器人有高速并联机械手、重型机械臂等。 在包装机械进行工作时,包装的精度会极大影响 产品的质量,如机器人转换工作任务,就需要对机器 人的位置和零点等进行重新测量,而并联机构本身具 有刚度大、结构稳定、精度高^[4-10]等固有优点,因此, 并联机构非常适合作为包装机械的测量和测试机构。

收稿日期: 2020-12-06

基金项目:山西省自然科学基金(201801D121183)

作者简介:马春生(1974—),男,博士,中北大学副教授,主要研究方向为机构创新与机器人装备。

为了更好地利用并联机构优良的运动学特性,许 多人都对并联机构进行了深入的探索和研究^[11-14]。 由于并联机构具有非线性、强耦合性、拓扑结构的复 杂性,因此无论是想要对并联机构进行类型综合还是 机构特性的研究,研究并联机构都是一项复杂而困难 的任务^[15]。为了能够充分发挥机构的优点,更好地控 制并联机构,需要对机构的逆运动学和可达空间进行 分析。

由于并联机构最大的缺陷是工作空间较小,有时 难以满足使用者的需求,因此采用串并混联的方式设 计 3SPR-6SPS 串并混联机构(S为球副,P为移动副, R 为旋转副)。这种连接方式极大地增加了机构的工 作空间,同时保留了并联机构的优点。

为了验证 3SPR-6SPS 串并混联机构作为测量机 构的可行性,进一步探索其性能,利用闭环矢量法^[16] 求解机构的逆运动学方程,混联机构比并联机构的工 作空间的体积可增加 160%^[17],并且并联机构比串联 机构精度更高^[18],通过仿真求机构的工作空间,探究 并联机构作为测量机构的可行性。

1 机构描述和坐标系建立

3SPR-6SPS 串并混联机构由 2 个并联机构串联而成,见图 1,总共分为 2 层,上层是 6SPS 机构,6SPS 机构的支链用绳结构代替;下层是 3SPR 机构;3SPR





$${}^{B}_{A}R = Rot(x,\alpha)Rot(y,\beta)Rot(x,\gamma) = \begin{pmatrix} \cos\beta & \sin\beta\sin\gamma \\ \sin\alpha\sin\beta & -\sin\alpha\cos\beta\sin\gamma + \cos\alpha\cos\gamma \\ -\cos\alpha\sin\beta & \sin\alpha\cos\gamma + \cos\alpha\cos\beta\sin\gamma \end{pmatrix}$$

机构的动平台与 6SPS 机构的底座固连,3 个平台从 下至上依次记为 A, B, C 平台。平台的形状均为正 三角形。3 个平台的边长分别为 L_1 , L_2 , L_3 。3 个平 台 的 顶 点 分 别 用 $a_i(i=1,2,3)$, $d_i(i=1,2,3)$, $c_i(i=1,2,3)$ 表示。3SPR 机构的 3 个旋转副的位置则 用 $b_i(i=1,2,3)$ 表示。 $a_i(i=1,2,3)$ 和 $b_i(i=1,2,3)$ 之间的 移动副用 $P_{i1}(i=1,2,3)$ 表示; $d_i(i=1,2,3)$ 和 $c_i(i=1,2,3)$ 之间的移动副用 $P_2(i=1,2,3,4,5,6)$ 表示。

2 逆运动学分析

2.1 3SPR 并联机构的逆运动学分析

建立静坐标系 *O-XYZ* 固连于平台 A, 以外接圆的圆心作为坐标原点, *Z* 轴竖直向上, *X* 轴平行于 *a*₃*a*₂,并与其方向相同,依据右手螺旋法则可以得到 *Y* 轴,假设平台 A 的外接圆半径为 *r*_A,则:

$$a_{1} = \begin{pmatrix} a_{1x} \\ a_{1y} \\ a_{1z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -r_{A} \\ 0 \end{pmatrix}, \quad a_{2} = \begin{pmatrix} a_{2x} \\ a_{2y} \\ a_{2z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2} r_{A} \\ \frac{1}{2} r_{A} \\ 0 \end{pmatrix},$$

$$a_{3} = \begin{pmatrix} a_{3x} \\ a_{3y} \\ a_{3z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{\sqrt{3}}{2} r_{A} \\ \frac{1}{2} r_{A} \\ 0 \end{pmatrix}$$
(1)

同理,建立和平台 B 固连的坐标系 *o-xyz*。平台 B 的外接圆半径为 *r*_B,则:

$$b_{1} = \begin{pmatrix} b_{1x} \\ b_{1y} \\ b_{1z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -r_{B} \\ 0 \end{pmatrix}, \quad b_{2} = \begin{pmatrix} b_{2x} \\ b_{2y} \\ b_{2z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2} r_{B} \\ \frac{1}{2} r_{B} \\ 0 \end{pmatrix},$$

$$b_{3} = \begin{pmatrix} b_{3x} \\ b_{3y} \\ b_{3z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{\sqrt{3}}{2} r_{B} \\ \frac{1}{2} r_{B} \\ 0 \end{pmatrix}$$
(2)

设 X_o , Y_o , Z_o 为平台 B 上的 o 点在平台 A 的坐标系 O-XYZ 中的位置坐标, ${}^{B}_{A}R$ 为平台 A 和平台 B 之间的坐标转换矩阵。设 α , β , γ 为 3 个欧拉角,使用 X-Y-X 型欧拉旋转,旋转变换矩阵 ${}^{B}_{A}R$ 表示为:

$$\frac{\sin\beta\cos\gamma}{-\sin\alpha\cos\beta\cos\gamma - \cos\alpha\sin\gamma} = \begin{pmatrix} u_x & v_x & w_x \\ u_y & v_y & w_y \\ u_z & v_z & w_z \end{pmatrix}$$
(3)

设 $p_{i1}(i=1,2,3)$ 为移动副 $P_{i1}(i=1,2,3)$ 的方向矢 量,则 $p_{i1} = b_i - a_i$ (*i*=1,2,3)。旋转副 R 的旋转轴线 与移动副 P 所在的直线垂直,则:

$$p_{i1} \cdot l_i = 0$$
 $i = 1, 2, 3$ (4)

以移动副 P_{11} 所在的支链为例,旋转副 R_1 的轴线 方向和 l_1 平行,因此 l_1 和 p_{11} 分别为:

$$l_{1} = {}_{A}^{B} \mathbf{R} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_{x} \\ u_{y} \\ u_{z} \end{pmatrix}$$
(5)

$$\boldsymbol{p}_{11} = {}^{\mathrm{B}}_{\mathrm{A}} \boldsymbol{R} \boldsymbol{b}_{1} + \boldsymbol{o}_{\mathrm{A}} - \boldsymbol{a}_{1} = \begin{bmatrix} \begin{pmatrix} u_{x} & v_{x} & w_{x} \\ u_{y} & v_{y} & w_{y} \\ u_{z} & v_{z} & w_{z} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ -\boldsymbol{r}_{\mathrm{B}} \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_{o} \\ Y_{o} \\ Z_{o} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ -\boldsymbol{r}_{\mathrm{A}} \\ 0 \end{pmatrix} \end{bmatrix}$$
(6)

将式(5)和式(6)代入(4)中得:

$$X_o u_x + Y_o u_y + Z_o u_z = -r_A u_y \tag{8}$$

同理, 驱动分支 P21 所在的支链通过分析可得:

$$l_{2} = {}_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \boldsymbol{R} \cdot \begin{pmatrix} -\frac{\sqrt{3}}{2} r_{\mathrm{B}} \\ \frac{1}{2} r_{\mathrm{B}} \\ 0 \end{pmatrix} - {}_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \boldsymbol{R} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ -r_{\mathrm{B}} \\ 0 \end{pmatrix}$$
(9)

$$\mathbf{p}_{21} = {}^{\mathrm{B}}_{\mathrm{A}} \mathbf{R} b_{2} + o_{\mathrm{A}} - a_{2} = \begin{bmatrix} \left(u_{x} & v_{x} & w_{x} \\ u_{y} & v_{y} & w_{y} \\ u_{z} & v_{z} & w_{z} \end{bmatrix} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} r_{\mathrm{B}} \\ \frac{1}{2} r_{\mathrm{B}} \\ 0 \end{bmatrix} + \left(\frac{X_{o}}{Z_{o}} \right) - \left(\frac{\sqrt{3}}{2} r_{\mathrm{A}} \\ \frac{1}{2} r_{\mathrm{A}} \\ 0 \end{bmatrix} \end{bmatrix}$$
(10)

$$X_{o}v_{x} + Y_{o}v_{y} + Z_{o}v_{z} = \frac{\sqrt{3}r_{A}\left[3\left(v_{x} - u_{y}\right) + \sqrt{3}\left(v_{y} - u_{x}\right)\right]}{6}$$
(11)

同理:

$$l_{3} = {}_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \mathbf{R} \cdot \begin{pmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2} r_{\mathrm{B}} \\ \frac{1}{2} r_{\mathrm{B}} \\ 0 \end{pmatrix} - {}_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \mathbf{R} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ -r_{\mathrm{A}} \\ 0 \end{pmatrix}$$
(12)

$$\boldsymbol{p}_{31} = {}^{\mathrm{B}}_{\mathrm{A}} \boldsymbol{R} \boldsymbol{b}_{3} + \boldsymbol{o}_{\mathrm{A}} - \boldsymbol{a}_{3} = \begin{bmatrix} \begin{pmatrix} u_{x} & v_{x} & w_{x} \\ u_{y} & v_{y} & w_{y} \\ u_{z} & v_{z} & w_{z} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -\frac{\sqrt{3}}{2} r_{\mathrm{B}} \\ \frac{1}{2} r_{\mathrm{B}} \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_{o} \\ Y_{o} \\ Z_{o} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} -\frac{\sqrt{3}}{2} r_{\mathrm{A}} \\ \frac{1}{2} r_{\mathrm{A}} \\ 0 \end{pmatrix} \end{bmatrix}$$
(13)

$$X_{o}v_{x} + Y_{o}v_{y} + Z_{o}v_{z} = \frac{\sqrt{3}r_{A}\left[3\left(u_{y} - v_{x}\right) + \sqrt{3}\left(v_{y} - u_{x}\right)\right]}{6}$$
(14)

同理,由式(8)和式(11)以及式(14)可得:

$$\begin{cases} X_{o} = \frac{r_{A}u_{y}(-v_{y}-u_{x}) - 2Z_{o}(u_{y}v_{z}+u_{z}v_{y})}{2(u_{y}v_{x}-u_{x}v_{y})} \\ Y_{o} = \frac{r_{A}u_{x}(v_{y}-u_{x}) + 2r_{A}u_{y}v_{x} + 2Z_{o}(u_{z}v_{x}+u_{x}v_{z})}{2(u_{x}v_{y}-u_{y}v_{x})} \end{cases}$$
(15)
$$\alpha = \gamma$$

3 条支链的方向可以用式(6),式(10)以及式(13)表示。由于在 *X_o*,*Y_o*,*Z_o*,*α*,*β*,γ 中已知 3 个量,因此通过式(16)可以求得移动副移动的距离,即 3SPR 并联机构的运动学逆解。

$$\begin{cases} |\boldsymbol{p}_{11}| = \begin{vmatrix} {}^{\mathrm{B}}_{\mathrm{A}} \boldsymbol{R} b_{1} + o_{\mathrm{A}} - a_{1} \end{vmatrix} \\ |\boldsymbol{p}_{21}| = \begin{vmatrix} {}^{\mathrm{B}}_{\mathrm{A}} \boldsymbol{R} b_{2} + o_{\mathrm{A}} - a_{2} \end{vmatrix} \\ |\boldsymbol{p}_{31}| = \begin{vmatrix} {}^{\mathrm{B}}_{\mathrm{A}} \boldsymbol{R} b_{3} + o_{\mathrm{A}} - a_{3} \end{vmatrix}$$
(16)

2.2 6SPS 并联机构的逆运动学分析

同上文所述, 在平台 C 上建立坐标系 c'-x'y'z'。 可得 c_i(i = 1,2,3):

>

$$c_{1} = \begin{pmatrix} c_{1x} \\ c_{1y} \\ c_{1z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ r_{C} \\ 0 \end{pmatrix}, \quad c_{2} = \begin{pmatrix} c_{2x} \\ c_{2y} \\ c_{2z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{\sqrt{3}}{2}r_{C} \\ -\frac{1}{2}r_{C} \\ 0 \end{pmatrix},$$

$$c_{3} = \begin{pmatrix} c_{3x} \\ c_{3y} \\ c_{3z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2}r_{C} \\ -\frac{1}{2}r_{C} \\ 0 \end{pmatrix}$$
(17)

 $\frac{\sin\beta'\cos\gamma'}{-\sin\alpha'\cos\beta'\cos\gamma' - \cos\alpha'\sin\gamma'} = \begin{pmatrix} u'_x & v'_x & w'_x \\ u'_y & v'_y & w'_y \\ u'_z & v'_z & w'_z \end{pmatrix} \quad (18)$ $\boldsymbol{n}_z = c - h = \frac{c}{R}c + c'_z - h \quad (19)$

$$p_{i_2} = c_i = b_i = B_i c_i + c_B = b_i$$
 (19)
为了统一坐标系,在 *O*-*XYZ* 坐标系下进行计算,

将式(19)转换为式(20):

$$\boldsymbol{p}_{i2} = \boldsymbol{c}_i - \boldsymbol{b}_i = {}_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \boldsymbol{R} {}_{\mathrm{B}}^{\mathrm{C}} \boldsymbol{R} \boldsymbol{c}_i + {}_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \boldsymbol{R} \boldsymbol{c}_{\mathrm{B}}' - {}_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \boldsymbol{R} \boldsymbol{b}_i$$
(20)

式(20)为6SPS机构在定坐标系 O-XYZ下的运动学逆解。

整个机构的运动学逆解为:

$$|\boldsymbol{p}_{i1}| = |b_i - a_i| = | {}_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \boldsymbol{R} b_i + o_{\mathrm{A}} - a_i | \qquad i = 1, 2, 3$$
$$|\boldsymbol{p}_{i2}| = |c_i - b_i| = | {}_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \boldsymbol{R} {}_{\mathrm{B}}^{\mathrm{C}} \boldsymbol{R} c_i + {}_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \boldsymbol{R} c_{\mathrm{B}}' - {}_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} \boldsymbol{R} b_i | \qquad i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$$
(21)

3 工作空间分析

在软件 SolidWorks 中设定好机构的尺度参数后, 设定驱动副的最大值和最小值,见表 1 和表 2。依次 遍历机构的所有配置空间。

仿真步骤如下所述。

1) 设
$$P_{11} = l_{\text{max}}$$
 , $P_{12} = P_{22} = P_{32} = P_{42} = P_{52} = P_{62} = l_{\text{max}}$ °

2) 设 $P_{21} = l_{\min} + [(l_{\max} - l_{\min})/n]$, $P_{31} = l_{\min}$, 可求 出机构的部分子工作空间。

3)设 P₂₁ = l_{min}, P₃₁ = l_{min} + [(l_{max} - l_{min})/n], 可求 出机构的另一部分子工作空间。

4) 设 P₂₁ = l_{max}, 重复步骤 1 和步骤 3。

5) 设 $P_{31} = l_{\text{max}}$, 重复步骤1和步骤3。

6) 设 $P_{12} = P_{22} = P_{32} = P_{42} = P_{52} = P_{62} = l_{min}$, 重复步骤 1 到步骤 5。

根据以上步骤,遍历所有的支链,将所得的子工 作空间进行合并。得到总体的工作空间即为整个机构 的工作空间。工作空间的绘制步骤见表 3。

利用上述步骤产生的数据进行模拟仿真,并进行 绘制,工作空间形状见图 2。

7	表 1	新型 3SPR-6SPS 混联机构结构参数
Tab.1 Structural p	aram	eters of the new 3SPR-6SPS serial-parallel manipulator

平台 C 半径	平台 B 半径	平台 A 半径	连杆初始长度	连杆长度变化范围	球副转角范围
r _c /mm	r _B /mm	r _A /mm	/mm	<i>l_i/mm</i>	<i>θ_i/</i> (°)
100	200	200	250	$250 \leq l_i \leq 450$	$250 \leq \theta_i \leq 450$

表 2 求解工作空间的参数设定 Tab.2 Parameter setting for solving workspace

搜索方向	初始数值及搜索幅度
沿 X 轴方向/mm	$0 (-600 \le X \le 600)$
沿 Y 轴方向/mm	$0 (-600 \le Y \le 600)$
沿Z轴方向/mm	-150 (-150≤Z≤300)
姿态角 α/(°)	$0(-30^{\circ} \leq \alpha \leq 30^{\circ})$
姿态角 β/(°)	$0(-60^{\circ} \leq \beta \leq 60^{\circ})$
姿态角 γ/(°)	$0(-60^{\circ} \leq \gamma \leq 60^{\circ})$

表 3 工作空间绘制 Tab.3 Workspace drawing

				-	8			
P_{11}	P_{12}	<i>P</i> ₁₃	P_{21}	P ₂₂	P ₂₃	P_{24}	P_{25}	P_{26}
$l_{\rm max}$	$l_{\rm max}$	$l_{\rm max}$	$l_{\rm max}$	$l_{\rm max}$	l_{\max}	$l_{ m max}$	l_{\max}	$l_{\rm max}$
$l_{\rm max}$	$l_{\rm max} \sim l_{\rm min}$	$l_{\rm max} \sim l_{\rm min}$	$l_{\rm max}$	$l_{\rm max}$	l_{\max}	l_{\max}	$l_{\rm max}$	$l_{\rm max}$
$l_{\rm max}$	l_{\min}	l_{\min}	$l_{\rm max}$	$l_{\rm max}$	l_{\max}	l_{\max}	$l_{\rm max}$	$l_{\rm max}$
$l_{\rm max}$	$l_{\rm min} \sim l_{\rm max}$	l_{\min}	$l_{\rm max}$	$l_{\rm max}$	l_{\max}	$l_{ m max}$	l_{\max}	$l_{\rm max}$
$l_{\rm max}$	$l_{\rm max}$	l_{\min}	$l_{\rm max}$	$l_{\rm max}$	l_{\max}	l_{\max}	$l_{\rm max}$	$l_{\rm max}$
$l_{\rm max} \sim l_{\rm min}$	$l_{\rm max}$	l_{\min}	$l_{\rm max}$	$l_{\rm max}$	l_{\max}	l_{\max}	$l_{\rm max}$	$l_{\rm max}$
l_{\min}	$l_{\rm max}$	$l_{\min} \sim l_{\max}$	$l_{\rm max}$	l_{\max}	l_{\max}	l_{\max}	l_{\max}	$l_{\rm max}$
l_{\min}	$l_{\rm max}$	l_{\max}	$l_{\rm max}$	l_{\max}	l_{\max}	l_{\max}	l_{\max}	$l_{\rm max}$
l_{\min}	$l_{\rm max} \sim l_{\rm min}$	l_{\max}	$l_{\rm max}$	l_{\max}	l_{\max}	l_{\max}	$l_{\rm max}$	$l_{\rm max}$
l_{\min}	l_{\min}	l_{\min}	l_{\min}	l_{\min}	l_{\min}	l_{\min}	l_{\min}	l_{\min}



图 2 3SPR-6SPS 串并联机构的工作空间 Fig.2 Workspace of 3SPR-6SPS serial-parallel mechanism

从仿真的结果可以看到,工作空间共有 18 个极 限位置和 30 条边界,工作空间连续,无空洞,形状 规则而对称,因此该机构可以作为机器人测量机构。

4 结语

文中提出一种 3SPR-6SPS 串并混联机构,通过 闭环矢量法求得其运动学逆解;利用 SolidWorks 软 件仿真分析得出该机构的工作空间。机构工作空间结 构紧凑而连续,结合串并混联机构工作空间大、精度 高等优点,验证了其作为机器人测量机构的可行性, 符合对于测量机构工作空间大、精度高的要求。

参考文献:

- [1] 刘冠麟. 柔性生产线的设计理论研究与应用[D]. 长春: 吉林大学, 2014: 9—10.
 LIU Guan-lin. Research and Application of Flexible Production Line Design Theory[D]. Changchun: Jilin University, 2014: 9—10.
- [2] 陈运军.基于工业机器人的"智能制造"柔性生产线 设计[J].制造业自动化, 2017, 39(8): 55—57.
 CHEN Yun-jun. Design of Intelligent Manufacturing Flexible Production Line Based on Industrial Robot[J]. Manufacturing Automation, 2017, 39(8): 55—57.
- [3] 刘振宇,陈英林,曲道奎,等. 机器人测量技术研究
 [J]. 机器人, 2002(5): 447—450.
 LIU Zhen-yu, CHEN Ying-lin, QU Dao-gui, et al. Research on Robot Calibration Technology[J]. Robot, 2002(5): 447—450.
- [4] HUANG Z, LI Q C. Type Synthesis of Symmetrical Lower Mobility Parallel Mechanisms Using the Constraint-synthesis Method[J]. The International Journal of Robotics Research, 2003, 22(1): 59–82.
- [5] GAO F, LI W, ZHAO X, et al. New Kinematic Structures for 2-, 3-, 4-, and 5-DOF Parallel Manipulator Designs[J]. Mechanism and Machine Theory, 2002, 37(11): 1395—1411.
- [6] KUNG P C, LIN C C K, JU M S. Neuro-Rehabilitation Robot-Assisted Assessments of Synergy Patterns of

Forearm, Elbow and Shoulder Joints in Chronic Stroke Patients[J]. Clinical Biomechanics, 2010, 25(7): 647-654.

- [7] JOSHI S A, TSAI L W. Jacobian Analysis of Limited-DOF Parallel Manipulators[J]. Journal of Mechanical Design, 2002, 124(2): 254.
- [8] KIM J Y, YANG U J, PARK K. Design, Motion Planning And Control of Frozen Shoulder Rehabilitation Robot[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2014, 15(9): 1875—1881.
- [9] ZHAO J S, ZHANG S L, DONG J X, et al. Optimizing the Kinematic Chains for a Spatial Parallel Manipulator via Searching the Desired Dexterous Workspace[J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2007, 23(1): 38—46.
- [10] LU Y, HU B. Unification and Simplification of Velocity/Acceleration of Limited-Dof Parallel Manipulators with Linear Active Legs[J]. Mechanism and Machine Theory, 2008, 43(9): 1112–1128.
- [11] WANG M. Kinematics Analysis and Dimensional Synthesis of a Plane Symmetric 3-SPR Parallel Manipulator[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(15): 22.
- [12] NUNES W M, RODRIGUES L A, OLIVEIRA L P, et al. Cable-Based Parallel Manipulator for Rehabilitation of Shoulder and Elbow Movements[C]// IEEE Int Conf Rehabil Robot, 2011: 1—6.
- [13] GALLARDO-ALVARADO J, AGUILAR-NÁJERA C R, CASIQUE-ROSAS L, et al. Kinematics and Dynamics of 2(3-RPS) Manipulators by Means of Screw Theory and the Principle of Virtual Work[J]. Mechanism and Machine Theory, 2008, 43(10): 1281–1294.
- [14] 郗文超,赵晶,郝国帅,等.大型并联立式屏蔽泵的 轴系动力学分析[J]. 流体机械, 2018, 46(11): 34—38.
 XI Wen-chao, ZHAO Jing, HAO Guo-shuai, et al. Dynamic Analysis on Shaft System of Large Parallel Vertical Canned Pump[J]. Fluid Machinery, 2018, 46(11): 34—38.
- [15] 刘辛军,谢福贵,汪劲松.并联机器人机构学基础
 [M].北京:高等教育出版社,2018:139—141.
 LIU Xin-jun, XIE Fu-gui, WANG Jin-song. Fundamental of Parallel Robotic Mechanisms[M]. Beijing: Higher Education Press, 2018: 139—141.
- [16] 尹爱勇,张玉华,刘诗道,等. 基于闭环矢量法的六 足机器人关节位姿研究[J]. 南昌工程学院学报, 2009, 28(4): 4—7.
 YIN Ai-yong, ZHANG Yu-hua, LIU Shi-dao, et al. Research on Joint Pose of Hexapod Robot Based on Closed Loop Vector Method[J]. Journal of Nanchang Institute of Technology, 2009, 28(4): 4—7.
- [17] RASTEGARPANAH A, RAKHODAEI H, SAADAT M, et al. Path-Planning of a Hybrid Parallel Robot Using Stiffness and Workspace for Foot Rehabilitation[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2018, 10(1): 1—10.
- [18] BRIOT S, BONEV I. Are Parallel Robots More Accurate than Serial Robots[J]. Transactions-Canadian Society for Mechanical Engineering, 2007, 31(4): 445–455.