

无奇异完全各向同性 2T1R 型并联机构的结构综合

张彦斌^{1,2} 吴 鑫² 刘宏昭¹ 张明洪¹

1. 西安理工大学, 西安, 710048 2. 河南科技大学, 洛阳, 471003

摘要:提出了无奇异各向同性三自由度 2T1R 空间并联机构结构综合的一种系统方法。得到了 24 种新型无耦合并联机构方案和 24 种完全各向同性并联机构方案。在整个工作空间内, 完全各向同性并联机构的主动副速度与动平台速度之间的线性映射雅可比矩阵为 3×3 阶单位阵, 因此机构不存在奇异现象。由于无耦合并联机构和完全各向同性机构实现了主驱动器与动平台速度的一一对应关系, 从而解决了并联机构控制难的问题。给出了完全各向同性 2T1R 并联机构支路的构造设计原则。

关键词:并联机构; 结构综合; 无奇异; 完全各向同性; 雅可比矩阵

中图分类号:TH112; TP242 **文章编号:**1004—132X(2008)03—0277—05

Structural Synthesis of Singularity-free Fully-isotropic Parallel Mechanisms with 2T1R-type

Zhang Yanbin^{1,2} Wu Xin² Liu Hongzhao¹ Zhang Minghong¹

1. Xi'an University of Technology, Xi'an 710048

2. Henan University of Science & Technology, Luoyang, Henan, 471003

Abstract: A systemic method of structural synthesis was presented, which was used to achieve singularity-free fully-isotropic three-degrees-of-freedom spatial parallel mechanisms with 2T1R-type. 24 novel uncoupled and 24 fully-isotropic solutions are obtained. The Jacobian matrix linear mapping velocity vector space of the actuators and the moving platform of the fully-isotropic parallel manipulators proposed herein is the identity 3×3 matrix throughout the entire workspace, so all the mechanisms are singularity-free. The difficulty of control problem of parallel manipulators was resolved because there existed a one-to-one corresponding relation between the velocity space of actuated joints and the velocity space of moving platform. Moreover, design principles of limbs for the fully-isotropic parallel mechanism were explored.

Key words: parallel mechanism; structural synthesis; singularity-free; fully-isotropic; Jacobian matrix

0 引言

机构型综合是机构设计和机构创新的基础, 常用的并联机构结构综合的方法有基于群论法^[1]、基于螺旋理论法^[2-4]和基于单开链单元法^[5-7]。一般情况下, 这些方法都很难直接构造出无耦合并联机构。Gogu^[8]提出了基于线性变换理论的并联机构型综合, 这种方法不仅能构造无耦合并联机构, 还可实现完全各向同性并联机构的设计。利用这种方法综合出的机构在整个工作空间内不存在奇异性, 且可实现主动关节速度与动平台输出速度之间的一对一控制, 即机构动平台的单向运动只需一个驱动器控制。

本文在文献[8]的研究成果基础上, 根据线性变换理论提出了无奇异完全各向同性 2T1R 型(两平动一转动)空间并联机构结构综合的一种系统方法; 给出了无耦合并联机构支路的构造原则和设计方法; 应用所构造的运动链支路构建了 24

组新型无耦合并联机构方案, 并通过运动副替换得到 24 种无奇异完全各向同性并联机构。

1 并联机构的雅可比矩阵及并联机构分类

1.1 机构雅可比矩阵

对于并联机构, 动平台上一点 H 的速度与主动副速度 $\dot{\mathbf{q}}$ 间的关系可写为

$$\mathbf{A} \cdot {}^P(\mathbf{v}, \boldsymbol{\omega})_H^T = \mathbf{B} \dot{\mathbf{q}} \quad (1)$$

$${}^P\mathbf{v}_H = (v_x, v_y, v_z)^T$$

$${}^P\boldsymbol{\omega}_H = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)^T$$

式中, \mathbf{A} 为并联雅可比矩阵; \mathbf{B} 为串联雅可比矩阵; ${}^P\mathbf{v}_H$ 为动平台上一点 H 在参考系 P (固接于静平台) 中的线速度; ${}^P\boldsymbol{\omega}_H$ 为动平台相对于参考系的角速度。

将式(1)进一步整理得

$${}^P(\mathbf{v}, \boldsymbol{\omega})_H^T = \mathbf{J} \dot{\mathbf{q}} \quad (2)$$

$$\mathbf{J} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{B}$$

式中, \mathbf{J} 为机构全局雅可比矩阵, 简称雅可比矩阵。

式(2)揭示了机构主动副速度与动平台速度之间的线性映射关系。

收稿日期: 2006—11—03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50575180)

1.2 机构的各向同性

机构的各向同性与其雅可比矩阵 J 的条件数 (condition number) 相关, 条件数是评价机构运动学性能的一个重要的指标, 它是由雅可比矩阵的最大奇异值 σ_{\max} 与最小奇异值 σ_{\min} 的比值决定的。若用 $k(J)$ 表示雅可比矩阵的条件数, 有 $k(J) = \sigma_{\max} / \sigma_{\min}$, 由此可知, $k(J)$ 的取值范围为 $[1, \infty)$ 。显然, 条件数的最小值为 1 时矩阵有相同的奇异值, 此时矩阵映射一个单位球到另一个单位球 (尽管它们的大小不同), 这种情况称为各向同性。 $k(J)$ 越大, 说明动平台速度矢量空间的单位球映射到主动副速度矢量空间的失真程度越大。最差的情况是雅可比矩阵为奇异矩阵, 此时椭圆的一个半轴为零, 在三维空间内椭圆就退化为椭圆^[9]。

若雅可比矩阵中各元素的单位不同, 则要引入一个特征长度^[9], 用其来划分具有长度单位的雅可比矩阵元素, 以产生一个新的量纲一雅可比矩阵。这样, 雅可比矩阵中的两个奇异值才能相比较, 计算其条件数。

当机构在某一位形表现为各向同性时, 它的雅可比矩阵应满足

$$J^T J = \lambda^2 I \quad (3)$$

式中, λ 为量纲一非零值; I 为单位矩阵。

1.3 并联机构的分类

根据式 (2) 中雅可比矩阵形式的不同, 并联机构可分为下列 5 种类型: ① 完全各向同性并联机构, 即机构雅可比矩阵为对角线元素都相等的对角阵; ② 无耦合并联机构, 即机构雅可比矩阵为对角线元素不全相等的对角阵; ③ 解耦并联机构, 即雅可比矩阵为三角阵的并联机构; ④ 弱耦合并联机构, 即雅可比矩阵为梯形矩阵的并联机构; ⑤ 强耦合并联机构, 即雅可比矩阵非以上各种形式矩阵的并联机构。

2 基于线性变换理论的并联机构结构综合

2.1 线性变换理论

本文所综合的 2T1R 型空间并联机构的动平台的输出运动为沿 x 、 y 轴方向的移动和绕 y 轴的转动。机构包含三条运动链支路 $L_i (i = 1, 2, 3)$ 。每条支路的第一个构件表示静平台, 最后一个构件 n_{Li} 表示动平台, 且每条支路的第一个运动副为主动副。

对于任一机构, 可以通过线性变换 F 将其主动副速度空间 U 变换到其动平台速度空间 V 。由

式 (2) 可知, 在动平台的速度空间 V 内, 通过线性变换 F 有唯一的矢量 $F(\dot{q}) = {}^P(v, \omega)_H^T$ 与主动副速度空间 U 中的一个矢量速度 \dot{q} 相对应。 V 空间中的矢量 $F(\dot{q})$ 就是在线性变换 F 下 U 空间中矢量速度 \dot{q} 的像, 而 U 中的元素在 V 中的像的集合就是线性变换 F 的值域空间 R_F , 并有

$$\dim(R_F) = \text{rank}(F) = \text{rank}(J) \quad (4)$$

即, 值域空间 R_F 的维数等于线性变换 F 和雅可比矩阵 J 的秩。

由于机构 (或运动链) W 中两构件 a 、 b 间的相对空间 $S_{a/b}^W$ 的维数就是机构中两构件间的独立运动输出数, 因此 $S_{a/b}^W$ 的维数等于两构件间相对速度矢量空间 $R_{a/b}^W$ 的维数。相对空间 $S_{a/b}^W$ 表征了机构 W 中两构件间的连接度, 若 a 、 b 分别为机构的末端和初始构件, 那么 $S_{a/b}^W$ 的维数等于机构 W 的活动度 M_L ^[8], 因此有

$$\dim(S_{a/b}^W) = \dim(R_{a/b}^W) = M_L \quad (5)$$

对于并联机构, 动平台的运动输出速度应为各条运动链末端构件运动输出的交集。若用 Q 表示一个无耦合并联机构, 用 $R_{n/1}^Q$ 表示动平台相对于静平台的速度矢量空间的基, 则有

$$R_{n/1}^Q = R_{L1}^{L1} \cap R_{L2}^{L2} \cap R_{L3}^{L3} \quad (6)$$

因此无耦合并联机构的动平台和静平台间的活动度、相对空间以及相对速度矢量空间的基应满足下列条件:

(1) 当机构处于一般位置时 (当 $\dot{q}_1 \neq 0$ 、 $\dot{q}_2 \neq 0$ 和 $\dot{q}_3 \neq 0$ 时), 有

$$3 \leq M_{Li} = \dim(S_{n_{Li}}^{Li}) \leq 6 \quad i = 1, 2, 3 \quad (7)$$

$$M_Q = 3 \quad (8)$$

$$\dim(S_{n/1}^Q) = 3 \quad (9)$$

$$R_{n/1}^Q = (v_x, v_y, \omega_y) \quad (10)$$

(2) 当机构处于特殊位置时 (当一个主动副速度为零时, 即 $\dot{q}_i = 0$; $i = 1, 2, 3$), 有

$$\dim(S_{n/1}^Q) = 2 \quad (11)$$

$$R_{n/1}^Q = (v_y, \omega_y) \quad \dot{q}_1 = 0 \quad (12)$$

$$R_{n/1}^Q = (v_x, \omega_y) \quad \dot{q}_2 = 0 \quad (13)$$

$$R_{n/1}^Q = (v_y, v_y) \quad \dot{q}_3 = 0 \quad (14)$$

2.2 支路构造原则及其运动副配置

本文所构造的运动链支路为仅含有移动副 P 和转动副 R 的单开链, 其具体的构造设计原则如下:

(1) 各支路的第一个运动副为 P 副, 且为主动副, 记作 P 。

(2) 与同一构件相连运动副的轴线相互平行或垂直。

(3) 沿主动副轴线方向上, 支路末端构件的输出只为该支路主动输入的函数。

(4)若动平台有转动输出要求,那么各支路的最后一个运动副应为 R 副,且转动副的轴线应与动平台转动输出要求的方向平行。

(5)支路首、尾构件间的活动度、相对空间和相对速度空间应满足式(7)~式(14)。

按照上述设计原则,本文构造的满足 2T1R 型并联机构输出要求的支路方案如图 1 所示。图中,符号“⊥”表示运动副轴线相互垂直;符号“//”表示运动副轴线相互平行。例如,图 1j 所示支路的运动副配置为 $\underline{P} // R \perp P \perp // R \perp \perp R$,表示第一个运动副为主动副且其轴线与第二个运动副的轴

线平行;第二个运动副的轴线与第三个运动副的轴线垂直,依次类推;同时第二个运动副轴线与第四个副轴线平行,第三个运动副轴线与第五个运动副轴线垂直。其他运动链的表示意义相同。

根据式(6)~式(14),从图 1 中可选择不同的运动链结构形式作为 2T1R 型并联机构的支路。表 1~表 3 分别给出了三个支路运动副的配置方式。下标 $x、y、z$ 分别表示运动副沿坐标轴的配置方位和支路末端构件的相对速度方向。若相邻两运动副的下标相同则两运动副轴线平行,否则两运动副轴线垂直。

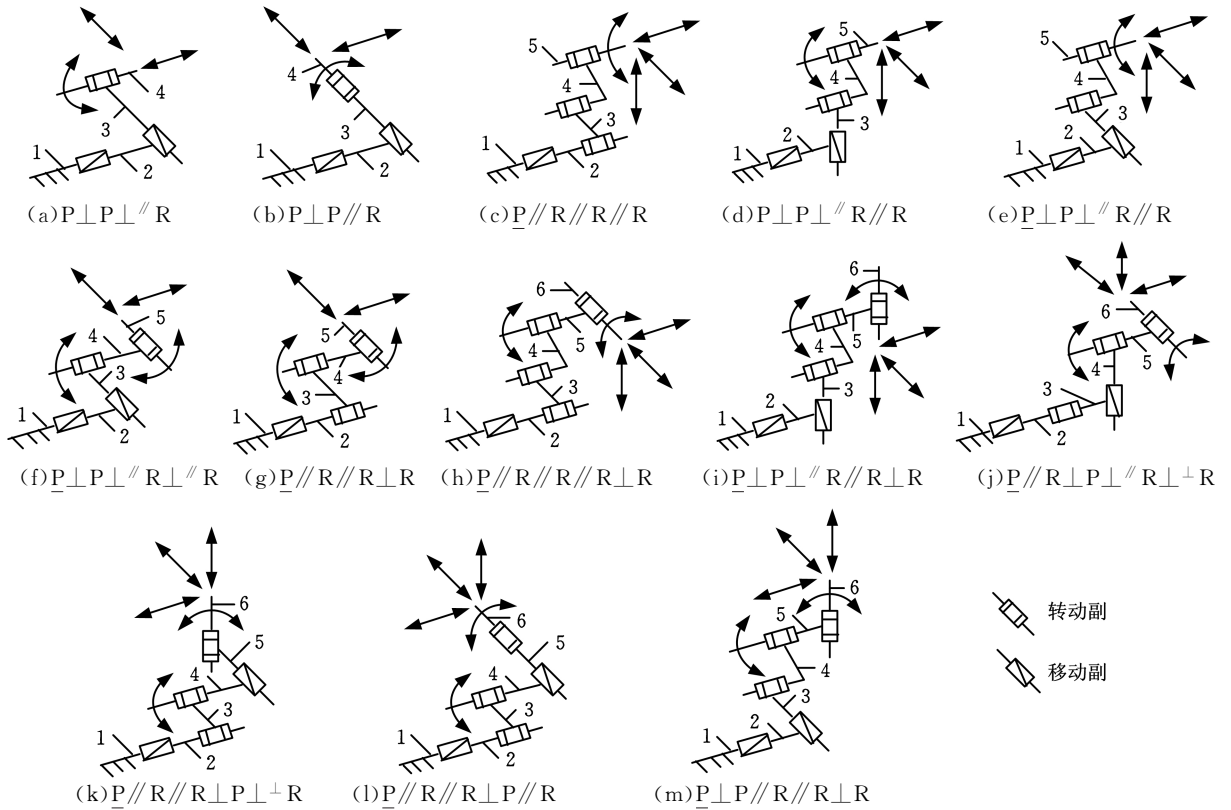


图 1 2T1R 型并联机构的支路结构简图

表 1 第一条支路的运动副配置

序号	类型	活动度 M_L	运动副配置方式	基 $R_{n/1}^Q$	特殊条件	方案数
1	\underline{PPR}	3	$\underline{P}_x - P_y - R_y$	(v_x, v_y, ω_y)		1
2	\underline{PPRR}	4	$\underline{P}_x - P_y - R_x - R_y$	$(v_x, v_y, \omega_x, \omega_y)$		1

表 2 第二条支路的运动副配置

序号	类型	活动度 M_L	运动副配置方式	基 $R_{n/1}^Q$	特殊条件	方案数
1	\underline{PPR}	3	$\underline{P}_y - P_x - R_y$	(v_x, v_y, ω_y)		1
2	\underline{PRRR}	4	$\underline{P}_y - R_y - R_y - R_y$	$(v_x, v_y, \omega_x, \omega_y)$		1
3	\underline{PPRR}	4	$\underline{P}_y - P_c - R_y - R_y$	$(v_x, v_y, \omega_x, \omega_y)$	$c = x, z$	2

表 3 第三条支路的运动副配置

序号	类型	活动度 M_L	运动副配置方式	基 $R_{n/1}^Q$	特殊条件	方案数
1	\underline{PRRRR}	5	$\underline{P}_z - R_z - R_z - R_z - R_y$	$(v_x, v_y, v_z, \omega_y, \omega_z)$		1
2	\underline{PPRRR}	5	$\underline{P}_z - P_c - R_z - R_z - R_y$	$(v_x, v_y, v_z, \omega_y, \omega_z)$	$c = x, y$	2
3	\underline{PRRRR}	5	$\underline{P}_z - R_z - P_c - R_z - R_y$	$(v_x, v_y, v_z, \omega_y, \omega_z)$	$c = x, y$	2
4	\underline{PRRRR}	5	$\underline{P}_z - R_z - R_z - P_c - R_y$	$(v_x, v_y, v_z, \omega_y, \omega_z)$	$c = x, y$	2

2.3 无耦合并联机构的结构综合

从表 1~表 3 中分别取一条支路就可构成一个无耦合 2T1R 型并联机器人机构,因此机构方案总数为 $2 \times 3 \times 4 = 24$ 种。以 $\underline{P}_x - \underline{P}_y - \underline{R}_y$ 、 $\underline{P}_y - \underline{R}_y - \underline{R}_y$ 和 $\underline{P}_z - \underline{R}_z - \underline{R}_z - \underline{R}_z - \underline{R}_y$ 组合方案为例,其结构如图 2 所示。 r (即 GH)、 φ_y 分别为动平台的长度和相对于 y 轴的转角。支路 1 与支路 2 的最后一个 R 副共轴线,且该共轴线与支路 3 的最后一个 R 副轴线平行,而动平台上的 GH 线段垂直于这三个 R 副的轴线。 \dot{q}_1 、 \dot{q}_2 、 \dot{q}_3 分别表示三个驱动副的速度。根据式(2)可得出动平台的运动方程为

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$a = \frac{1}{r \cos \varphi_y}$$

由式(15)可知,动平台的速度 v_x 、 v_y 、 ω_y 与主动副的速度 \dot{q}_1 、 \dot{q}_2 、 \dot{q}_3 间为一一对应关系,即 $v_x = \dot{q}_1$ 、 $v_y = \dot{q}_2$ 、 $\omega_y = a\dot{q}_3$,所以该机构为无耦合并联机构。如果 φ_y 的取值范围为 $(-\pi/2, \pi/2)$,则机构在整个工作空间内不存在奇异现象。由于雅克比矩阵中前两列元素为量纲一数值,而第三列元素的单位为长度单位的倒数 m^{-1} ,所以无法直接比较矩阵中各奇异值的大小,因此还要引入一个特征长度 l_c 来对第三列元素进一步进行划分,以使得整个雅克比矩阵为量纲一矩阵。根据完全各向同性并联机构的定义可知,当 $\varphi_y = 0$ 和 $l_c = r = 1$ 时,该并联机构的运动为完全各向同性。

2.4 完全各向同性并联机构的结构综合

将图 2 中第三条支路的主动副 \underline{P} 用两个轴线平行转动副代替,并满足两轴线间距离等于 r 的结构条件(图 3)。替换后该支路的运动副配置为 $\underline{R}_x - \underline{R}_x - \underline{R}_z - \underline{R}_z - \underline{R}_y$,且以位于静平台的转动副 \underline{R}_x 为主动副, q_3 为连杆 r 的角位移。下标 e 表示主动副的轴线方向,其平行于 xoy 平面,但不能平行于 y 轴,另外两条运动链结构保持不变。这种情况下,

在机构的整个工作空间内,其运动雅可比矩阵为 3×3 阶单位阵,因此机构为无奇异完全各向同性机构。对于其他的 23 种无耦合并联机构的方案也可采用同样的方法得到其完全各向同性机构。

3 结论

基于线性变换理论提出了无耦合与无奇异完全各向同性 2T1R 型并联机构结构综合的一种系统方法。得到了 24 种新型无耦合并联机构方案和 24 种完全各向同性并联机构方案。由于无耦合并联机构和完全各向同性机构实现了主驱动器与动平台的速度的一一对应关系,因此这解决并联机构难以控制的问题。在整个工作空间内,无耦合并联机构的主动副速度与动平台速度之间的线性映射雅可比矩阵为对角阵,而完全各向同性并联机构的主动副速度与动平台速度之间的线性映射雅可比矩阵为单位矩阵,因此这些机构在工作空间内都不存在奇异现象。给出了各向同性并联机构支路的构造设计原则,并构造出 13 种满足 2T1R 型无耦合并联机构设计要求的运动支链。文中所有的机构只含有 P 副和 R 副单开链支路,若将其中的一个或多个运动副用 C 副、U 副或 S 副代替;或者将单开链用含有平面闭回路结构的混合链代替,则又可得到更多的无耦合或完全各向同性的 2T1R 型并联机构。

参考文献:

- [1] Herve J M, Sparacino F. Synthesis of Parallel Manipulators Using Lie-groups: Y-STAR and H-ROBOT[C]//Proc. IEEE Intl. Workshop on Advanced Robotics. Tsukuba, Japan, 1993:75-80.
- [2] Huang Z, Li Q C. Type Synthesis of Symmetrical Lowermobility Parallel Mechanisms Using the Constraint Synthesis Method[J]. The International Journal of Robotics Research, 2003, 22(1): 59-79.
- [3] 郭盛,方跃法. 5 自由度并联机器人设计方法[J]. 机器人, 2004, 26(3):241-245.
- [4] 于靖军,赵铁石,毕树生,等. 三维平动并联机构型综合研究[J]. 自然科学进展, 2003, 13(8):843-850.

图 3 完全各向同性 2T1R 机构

SDDC 型双作用液动旋冲接头能量利用率研究

王克雄 郭 清 张 劲
中国石油大学(北京), 北京, 102249

摘要:对 SDDC 型双作用液动旋冲接头主要工作过程中的能量转化及利用问题进行了分析,建立了该型双作用液动旋冲接头各工作过程的能量方程。依据能量方程,推导出了液动旋冲接头的单次冲击能量、冲击频率、水力能量利用率的计算模型,并对计算模型进行了验证。研究了泵的排量、泵压、旋冲接头的结构尺寸,以及冲锤质量等对泥浆泵工作情况及水力能量利用的影响,研究结果表明:泥浆泵的泵压、排量增大,SDDC 型双作用液动旋冲接头的单次冲击能量、工作频率、水力能量利用率增大,反之,则相应减小;旋冲接头的结构尺寸和冲锤质量对水力能量的利用率影响也很大。

关键词:液动旋冲接头;旋冲钻井;能量转换;泵压

中图分类号:TE21 **文章编号:**1004—132X(2008)03—0281—04

Study on Energy Ratio of SDDC Hydraulic Connector

Wang Kexiong Guo Qing Zhang Jin
China Petroleum University-Beijing, Beijing, 102249

Abstract: The energy equation of SDDC mode hydraulic connector was established during working, on the basis of analysis of energy transformation and utilization. According to the energy equation, a calculation model was set up, for single compact energy, compact frequency, and hydraulic energy ratio. At the same time, the influences of pump rate and pressure, dimensions and hammer mass on working process and hydraulic energy utilization were obtained. The results indicate the single compact energy, working frequency, and hydraulic energy ratio increase while the pump rate and rate increases. Also, the dimensions and hammer mass have obvious effects on the hydraulic energy ratio.

Key words: hydraulic rotating connector; rotating drilling; energy transformation; pump pressure

0 引言

目前,在我国西部的油气勘探钻井过程中,当遇到大段砾石层和灰岩地层时,一般采用旋冲钻井技术。旋冲钻井技术是在常规钻井的基础上增加冲击动载荷的作用,对于硬脆性地层来说,可以

在较小的冲击力作用下就能实现体积破碎,从而可提高钻井速度,延长钻头使用寿命。旋冲钻井技术的应用中,涉及一个关键部件,即接在钻头上部的液动旋冲接头。SDDC 型双作用液动旋冲接头采用钻井液驱动方式。钻井液在通过井底钻头中的喷嘴和通过钻柱与井眼之间的环空上返的过程中都要消耗一部分能量,而双作用液动旋冲接头工作时也要消耗钻井液的水力能量,消耗掉的

收稿日期:2006—07—21

基金项目: 中国石油天然气集团公司科技攻关项目(01005050110)

[5] 杨廷力,金琼,刘安心,等. 基于单开链的欠秩并联机器人机构型综合的一般方法[J]. 机械科学与技术, 2001, 20(3): 321-325.

[6] 沈惠平,杨廷力,刘安心,等. 一种新型三维平移并联机构及其位置分析[J]. 中国机械工程, 2004, 15(20): 1853-1856.

[7] Kong X W, Gosselin C M. Kinematics and Singularity Analysis of a Novel Type of 3—CRR 3DOF Translational Parallel Manipulator[J]. The International Journal of Robotics Research, 2002, 21(9): 791-798.

[8] Gogu G. Structural Synthesis of Fully— isotropic Translational Parallel Robots Via Theory of Linear Transformations[J]. European J. of Mechanics A/

Solid, 2004, 23: 1021-1039.

[9] Angeles J. 机器人机械系统原理——理论、方法和计算[M]. 宋伟刚,译. 北京:机械工业出版社, 2004.

(编辑 郭 伟)

作者简介:张彦斌,男,1974 年生。西安理工大学机械与精密仪器学院博士研究生,河南科技大学机电工程学院讲师。主要研究方向为机构学与并联机器人。发表论文 9 篇。吴 鑫,男,1957 年生。河南科技大学机电工程学院教授。刘宏昭,男,1954 年生。西安理工大学机械与精密仪器学院教授、博士研究生导师。张明洪,男,1967 年生。西安理工大学机械与精密仪器学院博士研究生。