

4-UPS-RPS 并联机器人机构及其静力学分析

邓 昱¹, 陈修龙¹, 孙先洋¹, 王素玉¹, 赵永生²

(1. 山东科技大学 机电学院, 青岛 266590; 2. 燕山大学 机械工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘 要: 提出了一种 4-UPS-RPS 新型空间 5 自由度并联机器人机构. 运用约束螺旋理论分析了 4-UPS-RPS 并联机器人机构实现 3 转动和 2 移动 5 个自由度运动的机构学原理, 计算其自由度, 分析其驱动输入选取的合理性. 建立了 4-UPS-RPS 并联机器人机构的静力学平衡方程和静力传递矩阵, 以该机构作为并联机床的应用实例, 求解其静力学方程. 该研究为并联机构的优化设计和运动规划提供了理论依据.

关键词: 并联机器人机构; 螺旋理论; 驱动输入; 静力学分析

中图分类号: TH 112

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2013)10-1464-04

4-UPS-RPS Parallel Robot Mechanism and Its Statics Analysis

DENG Yu¹, CHEN Xiu-long¹, SUN Xian-yang¹, WANG Su-yu¹, ZHAO Yong-sheng²

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. College of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, Hebei, China)

Abstract: A novel 4-UPS-RPS spatial five-degrees-of-freedom parallel robot mechanism is presented. The principles that the mechanism can perform three-dimensional rotation and two-dimensional translation are analyzed by using screw theory, the degree of freedom of the mechanism is calculated, and the actuating input selection is discussed. The force balance equation and static transfer matrix are established. Taking 4-UPS-RPS parallel robot mechanism as the application of parallel machine tool, the statics analysis is realized. This research can provide a theoretical basis for the optimum design and motion planning of 4-UPS-RPS parallel mechanism.

Key words: parallel robot mechanism; screw theory; actuating input; statics analysis

五自由度并联机构是少自由度并联机器人机构中极为重要的一类, 这类机构较 6 自由度并联机构结构简单, 较 3、4 自由度并联机构又具有较多的自由度, 可应用于 5 轴并联机床、并联式 5 坐标测量机或 5 自由度工业机器人等各类装备中, 应用潜力较大, 现已成为国际上机器人研究和应用的一个热点.

黄真等^[1]系统地综合出可实现连续运动的完全对称的 5 自由度并联机构; 赵永生等^[2]提出了一种非对称 5-UPS-PRPU 五自由度并联机构; 高峰

等^[3]提出了一种 4-PSU & 1-PU* U 五自由度并联机构; 汪劲松等^[4]提出了一种冗余驱动 5 自由度并联机构; 张宪民等^[5]提出了一种三维平动二维转动的 5 自由度并联机器人机构; 黄田等^[6]提出了一类新型可重构 5 自由度混联机械手; 赵明扬等^[7]提出了一种 3 分支 5 自由度混联的激光加工机器人机构. Piccin 等^[8]提出了一种新型 3 移动 2 转动 5 自由度并联机构. 总体来说, 目前对空间 5 自由度完全并联机构的研究相对较少, 可选用的机构构型也

收稿日期: 2012-09-06.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51005138); 山东科技大学杰出青年基金资助项目(2011KYJQ102).

作者简介: 邓 昱(1977—), 女, 讲师, 主要从事并联机构学方面的研究, E-mail: dengyuwork@126.com.

通信作者: 陈修龙(1976—), 男, 副教授, 主要从事并联机器及其动力学方面的研究, E-mail: cxldy99@163.com.

非常有限,因此影响了这类机构的实际应用。

本文提出了一种新型 4-UPS-RPS 空间 5 自由度并联机构,运用约束螺旋理论,对该机构的自由度、瞬时性和输入选取进行分析;建立了机构的静力平衡方程,求解了机构的静力学方程。该研究可为机构的进一步研究和实用化提供理论依据。

1 五自由度并联机构模型与自由度分析

1.1 并联机构模型

4-UPS-RPS 空间 5 自由度并联机构由动平台、定平台、连接动平台和定平台的 5 个分支等组成。定平台通过 4 个结构完全相同的驱动分支 UPS(虎克铰-移动副-球副)以及另一个驱动分支 RPS(转动副-移动副-球铰)与动平台相连接。

1.2 分支运动链 UPS 对动平台施加的结构约束

UPS 分支的运动螺旋可表示为

$$\$_{i1} = (1 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 0) \quad (1)$$

$$\$_{i2} = (0 \ 1 \ 0; 0 \ 0 \ 0) \quad (2)$$

$$\$_{i3} = (0 \ 0 \ 0; 0 \ \phi_{3i} \ \varphi_{3i}) \quad (3)$$

$$\$_{i4} = (1 \ 0 \ 0; 0 \ -l_i \phi_{3i} \ -l_i \varphi_{3i}) \quad (4)$$

$$\$_{i5} = (0 \ -\varphi_{3i} \ \phi_{3i}; -l_i \ 0 \ 0) \quad (5)$$

$$\$_{i6} = (0 \ \phi_{3i} \ \varphi_{3i}; 0 \ 0 \ 0) \quad (6)$$

式中:下标 i 表示机构的第 i 个分支, $i=1, 2, 3, 4$; $\phi_{3i}^2 + \varphi_{3i}^2 = 1$; l_i 为驱动杆的长度。

由于该螺旋系中的 6 个螺旋是线性无关的,不存在反螺旋,因此机构中 4 个 UPS 分支对动平台无任何约束。

1.3 分支运动链 RPS 对动平台施加的结构约束

机构中 RPS 分支的运动螺旋可表示为

$$\$_1 = (1 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 0) \quad (7)$$

$$\$_2 = (0 \ 0 \ 0; 0 \ \alpha \ \beta) \quad (8)$$

$$\$_3 = (0 \ \alpha \ \beta; 0 \ 0 \ 0) \quad (9)$$

$$\$_4 = (1 \ 0 \ 0; 0 \ -l\beta \ l\alpha) \quad (10)$$

$$\$_5 = (0 \ -\beta \ \alpha; -l \ 0 \ 0) \quad (11)$$

式中: $\alpha^2 + \beta^2 = 1$; l 为驱动杆的长度。

令反螺旋 $\$^r = (m \ b \ c; d \ e \ f)$

$$\begin{cases} d = 0 \\ b\alpha + c\beta = 0 \\ -bl\beta + cl\alpha = 0 \\ -e\beta + f\alpha - ml = 0 \end{cases} \quad (12)$$

由式(12)得

$$\$^r = \frac{f}{l\alpha} (1 \ 0 \ 0; 0 \ -l\beta \ l\alpha) \quad (13)$$

反螺旋 $\r 表示一个约束力,该约束力限制了动平

台沿 X 轴线方向的移动。所以 4-UPS-RPS 空间并联机构的动平台具有 3 个转动和 2 个移动自由度。

1.4 机构的自由度及瞬时性分析

机构自由度计算的修正 Kutzbach-Grübler 公式为

$$M = d(n - g - 1) + \sum_{i=1}^g f_i + \nu - \zeta \quad (14)$$

式中: M 为机构的自由度; d 为机构的阶, $d = 6 - \lambda$, λ 为机构的公共约束数; n 为包括机架的构件数目; g 为运动副数目; f_i 为第 i 个运动副的自由度; ν 为多环并联机构在去除公共约束的因素后的冗余约束的数目; ζ 为机构中存在的局部自由度。

从上面分析可知,4-UPS-RPS 空间并联机构不存在公共约束,即 $\lambda = 0$; 多环并联机构在去除公共约束的因素后不存在冗余约束,即 $\nu = 0$; 机构不存在局部自由度,即 $\zeta = 0$,由机构自由度计算的修正 Kutzbach-Grübler 公式(14)可得

$$M = 6(12 - 15 - 1) + 29 = 5 \quad (15)$$

很显然,无论在机构的何种位形下,分支约束始终具

有 $\$^r = \frac{f}{l\alpha} (1 \ 0 \ 0; 0 \ -l\beta \ l\alpha)$ 的形式,所以机构的约束螺旋不会发生改变,因此该机构不是瞬时机构。

2 并联机构的驱动输入选择分析

在 4-UPS-RPS 空间并联机构中,选取 5 个分支中的移动副 P 作为驱动副,根据并联机构的输入选取原理^[9],如果输入合理,刚化 5 个驱动副后,重新确定机构中各分支约束螺旋,由各分支约束螺旋组成约束螺旋系的秩应该为 6。

2.1 RPS 分支约束螺旋分析

将移动副 P 刚化后该分支的运动螺旋系为

$$\$_1 = (1 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 0) \quad (16)$$

$$\$_2 = (0 \ \alpha \ \beta; 0 \ 0 \ 0) \quad (17)$$

$$\$_3 = (1 \ 0 \ 0; 0 \ -l\beta \ l\alpha) \quad (18)$$

$$\$_4 = (0 \ -\beta \ \alpha; -l \ 0 \ 0) \quad (19)$$

对上面螺旋系求反螺旋求得分支的约束螺旋系为

$$\$^r_5 = (0 \ \alpha \ \beta; 0 \ 0 \ 0) \quad (20)$$

$$\$^r_6 = (1 \ 0 \ 0; 0 \ -l\beta \ l\alpha) \quad (21)$$

由约束螺旋可知,刚化移动副 P 后 RPS 分支对动平台施加的是 2 个力线矢约束。

2.2 驱动输入选择分析

刚化 UPS 分支中的 4 个移动副 P 后,动平台受到 4 个约束力的作用;刚化 RPS 分支中的 1 个移动副 P 后,动平台受到 2 个约束力的作用。在结构参数选择的情况下,显然这 6 个约束力空间不交于一

点线性不相关,即动平台受到6个线性无关的反螺旋约束,自由度为零.因此,采用移动副作为机构的驱动输入是合理的.

3 并联机构的静力学分析

3.1 动平台受力分析

当4-UPS-RPS五自由度并联机构5个驱动杆杆长确定,并联机构位姿是一定的,这时该机构是稳定结构,如图1所示.动平台受力情况主要包括:

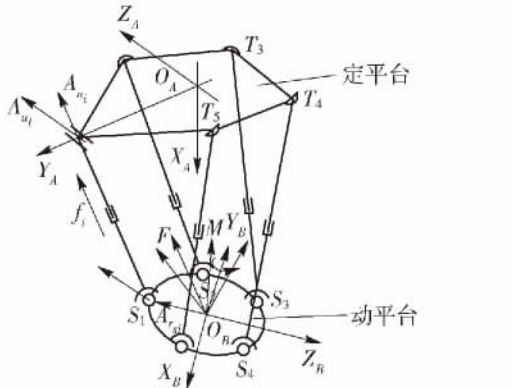


图1 4-UPS-RPS 并联机构速度分析示意

Fig.1 Velocity diagram of the 4-UPS-RPS mechanism

- 1) 5个驱动杆沿各自轴线方向的轴向驱动力,可表示为 $f = [f_1 \ f_2 \ f_3 \ f_4 \ f_5]^T$;
- 2) 平行于转动副轴线方向的结构约束力 f_a ;
- 3) 六维外力矢量负载 F 和 M 在定坐标系 $\{A\}$ 上表示为

$${}^A F = [{}^A F_x \ {}^A F_y \ {}^A F_z]^T \quad (22)$$

$${}^A M = [{}^A M_x \ {}^A M_y \ {}^A M_z]^T \quad (23)$$

3.2 并联机构的静力学平衡方程

如图1所示, ${}^A M$ 为动平台中心点 O_B 受到的合外力矩矢; ${}^A F$ 为测量机动平台受到的合外力矢; ${}^A n_i$ 为驱动杆 L_i 的单位方向矢量; ${}^A r_i$ 为铰链点 S_i 相对 O_B 的矢量半径,其中 ${}^A r_1$ 为转动副 S_1 相对 O_B 的矢量半径,逆时针方向依次为 ${}^A r_2$ 、 ${}^A r_3$ 、 ${}^A r_4$ 和 ${}^A r_5$; ${}^A u_1$ 为转动副轴线方向的单位矢量; f_i 是驱动杆 L_i 的驱动力; f_a 是平行 RPS 分支上转动副轴线方向的结构约束力,动平台的受力平衡方程为

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^5 {}^A n_i f_i + {}^A u_1 f_a + {}^A F = 0 \\ \sum_{i=1}^5 {}^A r_i \times {}^A n_i f_i + {}^A r_1 \times {}^A u_1 f_a + {}^A M = 0 \end{cases} \quad (24)$$

将静力学平衡方程表示为矩阵形式:

$$[-{}^A F \quad -{}^A M]^T = G [f \quad f_a]^T \quad (25)$$

式中: G 为动平台与驱动杆及结构约束之间静力传递矩阵

$$G =$$

$$\begin{bmatrix} {}^A n_1 & {}^A n_2 & {}^A n_3 & {}^A n_4 & {}^A n_5 & {}^A u_1 \\ {}^A r_1 \times {}^A n_1 & {}^A r_2 \times {}^A n_2 & {}^A r_3 \times {}^A n_3 & {}^A r_4 \times {}^A n_4 & {}^A r_5 \times {}^A n_5 & {}^A r_1 \times {}^A u_1 \end{bmatrix}$$

由于 $G \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ 为方阵,如果矩阵非奇异可得逆矩阵 G^{-1} , 则

$$[f \quad f_a]^T = G^{-1} [-{}^A F \quad -{}^A M]^T \quad (26)$$

由式(25)(26)可得并联机构5个驱动力、1个结构约束力和动平台所受六维外力矢量之间的正映射矩阵 G 和逆映射矩阵 G^{-1} .

3.3 静力学分析实例

4-UPS-RPS 并联机构作为机床时动平台受重力 $mg = 1058.4 \text{ N}$ 、外载荷 $F = [800 \quad -150 \quad -250]^T$ (N)、外力偶矩 $M = [-2.5 \quad 124 \quad -60]^T$ (kN/mm) 动平台在 XY 平面内以 $(900 \ 0 \ 0)$ 为圆心,以 $(950 \ 0 \ 0)$ 为起点作逆时针匀速圆周运动,圆周半径 $r = 50 \text{ mm}$. 根据推导出的4-UPS-RPS 并联机器人机构的静力学模型,利用 Matlab 数值计算可分别得到机构5个驱动杆的驱动力和结构约束力的曲线,如图2所示.

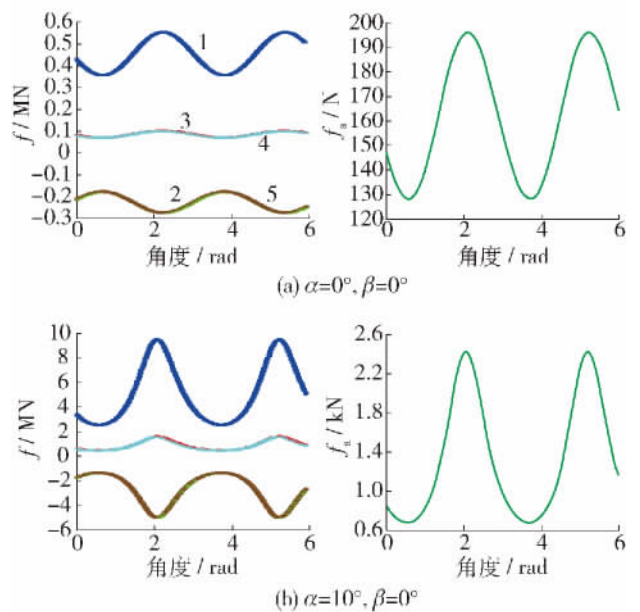


图2 静力分析曲线

Fig.2 Diagram of statics analysis

其中图2(a)(b)分别为整个运动过程中动平台的姿态角 $\alpha = \beta = 0^\circ$ 与 $\alpha = 10^\circ \ \beta = 0^\circ$ 时5个驱动杆的驱动力和结构约束力曲线图.由图2可知,驱动杆1承受驱动力较大,5个驱动杆受力和机构结构约束力大致呈正弦或余弦曲线波动变化,5个驱

动杆的受力大小和机构结构约束力大小与并联机构受到的外力负载和动平台的位姿有关系。

4 结论

1) 提出了一种 4-UPS-RPS 空间非对称并联机器人机构,应用约束螺旋理论分析了该机构的自由度,证明了 4-UPS-RPS 机构动平台具有 3 维转动和 2 维移动共 5 个自由度,而且该机构不是瞬时机构,该机构可选取其 5 个运动支链上的移动副 P 为主动副。

2) 建立了 4-UPS-RPS 空间并联机构的静力平衡方程,求解了机构的静力学。4-UPS-RPS 空间并联机构可用于研制并联式坐标测量机、工业机器人和微机器人等,具有很好的应用前景。

参考文献:

- [1] HUANG Zhen, LI Qin-chuan. Two novel symmetrical 5-DOF parallel manipulators [J]. Journal of Yanshan University, 2001, 25(4): 283-286.
- [2] 赵永生, 郑魁敬, 李秦川, 等. 5-UPS/PRPU 五自由度并联机床运动学分析 [J]. 机械工程学报, 2004, 40(2): 12-16.
ZHAO Yong-sheng, ZHENG Kui-jing, LI Qin-chuan, et al. Kinematic analysis of 5-UPS/PRPU 5-DOF parallel machine tool [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(2): 12-16. (in Chinese)
- [3] GAO Feng, PENG Bin-bin, ZHAO Hui, et al. A novel 5-DOF fully parallel kinematic machine tool [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006, 31(1/2): 201-207.
- [4] WU Jun, WANG Jin-song, WANG Li-ping, et al. Study on the stiffness of a 5-DOF hybrid machine tool with actuation redundancy [J]. Mechanism and Machine Theory, 2009, 44(2): 289-305.
- [5] 张宪民, 袁剑锋, 邱志成. 一种三维平动二维转动的五自由度并联机器人机构: 中国, 200510101134.3 [P]. 2006-07-12.
- [6] 刘海涛, 黄田, CHETWYND D G, 等. 5 自由度大工作空间/支链行程比混联机械手的概念设计与尺度综合 [J]. 机械工程学报, 2007, 43(6): 14-20.
LIU Hai-tao, HUANG Tian, CHETWYND D G, et al. Kinematic design of 5-DOF hybrid robot with large workspace/limb-stroke ratio [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(6): 14-20. (in Chinese)
- [7] 赵明扬, 姜春英, 罗振军, 等. 激光加工机器人: 中国, 200820010639.8 [P]. 2008-11-26.
- [8] PICCIN O, BAYLE B, MAURIN B, et al. Kinematic modeling of a 5-DOF parallel mechanism for semi-spherical workspace [J]. Mechanism and Machine Theory, 2009, 44(8): 1485-1496.
- [9] 李仕华. 几种空间少自由度并联机器人机构分析与综合的理论研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学机械工程学院, 2004.
LI Shi-hua. Some theoretical issues on analysis and synthesis of lower-mobility parallel mechanisms [D]. Qinhuangdao: College of Mechanical Engineering, Yanshan University, 2004. (in Chinese)

(责任编辑 杨开英)