

恒定雅可比 3-PRRR 移动并联机构及其传递性能研究

赵延治^{1,2} 梁博文^{1,2} 曹亚超^{1,2} 赵铁石^{1,2}

(1. 燕山大学河北省并联机器人与机电系统重点实验室, 秦皇岛 066004;

2. 燕山大学先进锻压成型技术与科学教育部重点实验室, 秦皇岛 066004)

摘要: 提出了一种具有雅可比矩阵恒定特性的 3-PRRR 三维移动并联机构, 当选取移动副作为主动输入时, 该机构具有雅可比矩阵恒定的特性。基于螺旋理论分析了 3-PRRR 并联机构自由度, 利用矢量法建立位置正/反解模型, 进而得到了该机构的工作空间。基于传递力螺旋和主运动螺旋求解了该机构的雅可比矩阵, 从得到的机构速度/力变化曲线可知, 在确定的输入下, 机构输出参数曲线在不同位姿下相重合, 从而验证了该机构雅可比矩阵恒定。在此基础上, 分析了该机构的传递性能, 得到了分支传递功率与 β (移动副和转动副轴线夹角) 的关系曲线, 可知输入功率不变时, 机构的传递功率随着 β 的增大而减小。分别选取 β 为 0° 和 30° 时绘制该机构输出速度和力曲线, 得到该机构在 β 为 0° 时传递性能最佳。

关键词: 并联机构; 螺旋理论; 雅可比矩阵; 传递性能

中图分类号: TH112 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2017)01-0333-06

3-PRRR Translational Parallel Mechanism with Constant Jacobian Matrix and Its Transfer Performance Analysis

ZHAO Yanzhi^{1,2} LIANG Bowen^{1,2} CAO Yachao^{1,2} ZHAO Tieshi^{1,2}

(1. Hebei Provincial Key Laboratory of Parallel Robot and Mechatronic System, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China

2. Key Laboratory of Advanced Forging & Stamping Technology and Science, Ministry of Education, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: A novel 3-PRRR three-dimensional translational parallel mechanism was proposed. Its Jacobian matrix was constant, when its prismatic pairs were chosen as the actuators. The degrees of freedom of the parallel mechanism was analyzed based on screw theory. The forward/inverse kinematic solution models were established to obtain its workspace by the vector method. Jacobian matrix of the mechanism was solved by the main twist screw and transmission wrench screw. Then, the curves of the output speed and force were drawn. According to the figures, the curves were completely coincident in different poses when the input parameters were certain. Thus, the conclusion that the Jacobian matrix of the 3-PRRR parallel mechanism kept constant was verified. On this basis, the transmissibility performance of the mechanism was further analyzed in order to obtain relationship between transmission power and angle β (the angle between axis of the prismatic pair and its nearest pair-the revolute pair) of each limb. Finally, another important conclusion was got. It can be expressed as: when the input power was definite and invariant, the transmission power of the mechanism was decreased with the increase of β . Comparison was made between output speed and force curves in two cases that β were equal to 0° and 30° , the transmissibility performance of the mechanism varied with β and the former was better than the latter. Similarly, after the transmissibility performances with other values of β were analyzed, the performance was optimal when β was 0° .

Key words: parallel mechanism; screw theory; Jacobian matrix; transmissibility performance

收稿日期: 2016-05-05 修回日期: 2016-06-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(51105322)、河北省自然科学基金项目(E2014203176)、河北省高等学校自然科学基金项目(QN2015040)、中国博士后科学基金项目(2016M590212)和燕山大学研究生创新项目(2017XJSS001)

作者简介: 赵延治(1981—),男,副教授,主要从事并联机器人机构学理论与应用研究,E-mail: yzzhao@ysu.edu.cn

引言

并联机构的雅可比矩阵描述了机构输入输出之间线性映射关系^[1-2],并联机构的许多性能评价指标都依赖其雅可比矩阵^[2-3]。一般而言,并联机构的雅可比矩阵会随着机构位姿变化而变化,其机构的输入输出映射关系也会随之变化,进而机构的各性能指标也会在工作空间内发生变化。若并联机构的雅可比矩阵在工作空间任意位姿下始终能保持恒定,则机构的传递性能等各性能指标在工作空间全域内都将保持恒定,这将对机构的设计分析与控制带来诸多便利。

在三维移动并联机构研究方面,文献[4-8]从机构运动学、空间位置等方向对三维移动并联机构进行了分析。在并联机构传递性能领域,文献[9-12]为分析并联机构的传递性能提供了理论依据,并以机构传递性能作为评价指标进行尺度优化^[13-19]。本文在分析得到3-PRRR并联机构雅可比矩阵始终保持恒定的基础上,利用瞬时传递功率分析机构的功率传递性能,通过速度/力雅可比矩阵,对机构的速度/力传递性能进行分析,并给出该机构传递性能达到最佳时的条件。

1 3-PRRR 并联机构

1.1 结构与约束特征

3-PRRR 并联机构的模型及坐标建立如图1所示。

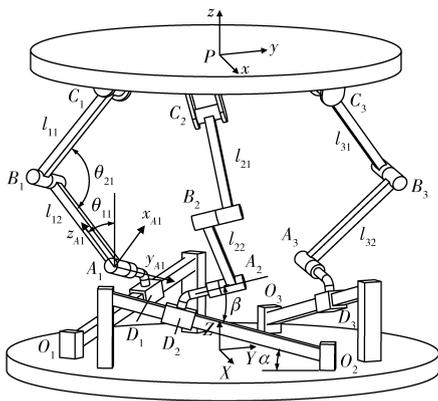


图1 3-PRRR 并联机构

Fig.1 3-PRRR parallel mechanism

3个转动副轴线互相平行,且与移动副轴线夹角为 β 。移动副沿着定平台上的导杆运动,3根导杆与水平面夹角为 α ,且导杆延长线在水平面上投影组成等边三角形,三角形外接圆半径为 R 。 O_i ($i=1,2,3$)为导杆端点, D_i ($i=1,2,3$)为移动副中心。3个转动副之间通过第1连杆 l_{i1} ($i=1,2,3$)和第2连杆 l_{i2} ($i=1,2,3$)相连,长度均为 l , A_i 、 B_i 、 C_i ($i=1,$

2,3)为转动副中心,各分支第1转动副中心与移动副中心的距离为 m ,第3转动副中心 C_1 、 C_2 、 C_3 3点组成等边三角形,其外接圆半径为 r 。

在定平台上建立基坐标系 $OXYZ$,其中 O 点为定平台中心点, Z 轴为定平台法线方向, Y 轴垂直于第三导杆, X 轴由右手定则确定。在动平台上建立动坐标系 $Pxyz$,其中 P 为等边三角形 $C_1C_2C_3$ 的中心, x 轴、 y 轴、 z 轴方向均与定坐标系 X 轴、 Y 轴、 Z 轴方向相同。在 A_i ($i=1,2,3$)点建立动坐标系 $A_ix_iy_iz_i$,其中 z_i 轴沿导杆向上, y_i 轴沿着转动副的轴线方向, x_i 轴由右手定则确定。

1.2 机构自由度分析

通过建立的分支坐标系可以写出分支中各运动副的运动螺旋

$$\begin{cases} \mathcal{S}_{i1} = (0 \ 0 \ 0; \ 0 \ \cos\beta \ \sin\beta) \\ \mathcal{S}_{i2} = (0 \ 1 \ 0; \ 0 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_{i3} = (0 \ 1 \ 0; \ P_{i3} \ 0 \ R_{i3}) \\ \mathcal{S}_{i4} = (0 \ 1 \ 0; \ P_{i4} \ 0 \ R_{i4}) \end{cases} \quad (1)$$

式中 i ——机构的第 i ($i=1,2,3$)个分支

P_{i3} 、 R_{i3} ——第二转动副位置参数

P_{i4} 、 R_{i4} ——第三转动副位置参数

由式(1)中分支的运动螺旋可求出各分支的约束螺旋为

$$\begin{cases} \mathcal{S}_{i1}^r = (0 \ 0 \ 0; \ 1 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_{i2}^r = (0 \ 0 \ 0; \ 0 \ 0 \ 1) \end{cases} \quad (2)$$

各分支的约束螺旋 \mathcal{S}_{i1}^r 、 \mathcal{S}_{i2}^r 分别为过分支坐标系原点并沿着 x_i 轴和 z_i 轴方向的约束力偶,由于各分支对称布置,3个分支坐标系 z_i 轴呈空间交错分布,而 x_i 轴与 z_i 轴互相垂直,因此3个分支对动平台共施加线性无关的偶量数目为3,约束了动平台3个转动自由度。

1.3 位置反解

设动坐标系原点 P 在基坐标系中的坐标为 (P_x, P_y, P_z) ,则 C_i ($i=1,2,3$)在动坐标系下的坐标分别为 ${}^P C_1(-\sqrt{3}r/2, -r/2, 0)$, ${}^P C_2(\sqrt{3}r/2, -r/2, 0)$, ${}^P C_3(0, r, 0)$ 。在分支坐标系下坐标分别为 ${}^{A_i} C_i(l\sin\theta_{2i}, 0, l-l\cos\theta_{2i})$, $i=1,2,3$ 。设 d_1 、 d_2 、 d_3 为驱动杆长 O_1D_1 、 O_2D_2 、 O_3D_3 的驱动变量, R_i ($i=1,2,3$)为分支坐标系与基坐标系之间的旋转变换矩阵,由图1可得

$$\begin{cases} R_1 = R_z(30^\circ)R_x(\alpha-\beta)R_y(-\theta_{11}) \\ R_2 = R_z(150^\circ)R_x(\alpha-\beta)R_y(-\theta_{12}) \\ R_3 = R_z(-90^\circ)R_x(\alpha-\beta)R_y(-\theta_{13}) \end{cases} \quad (3)$$

由于该机构是三维移动并联机构,所以动坐标系与基坐标系下的旋转变换矩阵为单位阵。通过

C_i 点坐标建立在不同坐标系下的关系

$${}^0C_i = {}^P C_i + I_{OP} \quad (4)$$

$${}^0C_i = R_i A_i C_i + I_{OA_i} \quad (5)$$

联立式(3)~(5)求得方程组,其中包含结构变量

$$\begin{cases} x_1 = \cos\theta_{1i}(l - l\cos\theta_{2i}) \\ x_2 = \sin\theta_{1i}(l - l\cos\theta_{2i}) \\ y_1 = l\sin\theta_{1i}\sin\theta_{2i} \\ y_2 = l\cos\theta_{1i}\sin\theta_{2i} \end{cases}$$

化简消去其中的结构变量求得 3-PRRR 机构的位置反解表达式

$$\begin{cases} d_1 = (-AP_x + \sqrt{3}AP_y + 2BP_z + \sqrt{3}RA + \\ \quad 2mA^2 + 2mB^2)/(2AC + 2BD) \\ d_2 = (-AP_x - \sqrt{3}AP_y + BP_z + \sqrt{3}RA + \\ \quad \sqrt{3}rA + 2mA^2 + mB^2)/(2AC + BD) \\ d_3 = (AP_x + BP_z + \sqrt{3}RA/2 + mA^2 + \\ \quad mB^2)/(AC + BD) \end{cases}$$

$$\text{其中} \quad A = \cos(\alpha - \beta) \quad B = \sin(\alpha - \beta) \\ C = \cos\alpha \quad D = \sin\alpha$$

1.4 位置正解

位置正解是已知并联机构的驱动变量 d_1 、 d_2 、 d_3 求解动平台的位置参数 P_x 、 P_y 、 P_z , 根据得到的位置反解表达式可知

$$\begin{cases} P_x = [- (2AC + 2BD)d_1 - (2AC + BD)d_2 + \\ \quad 3(AC + BD)d_3 + \sqrt{3}RA/2 + \sqrt{3}rA + \\ \quad mA^2 - 2mB]/(5A) \\ P_y = [- 2(2AC + 2BD)d_1 + 3(2AC + BD)d_2 + \\ \quad (AC + BD)d_3 - 3\sqrt{3}RA/2 - 3\sqrt{3}rA - \\ \quad 3mA^2]/(-5A) \\ P_z = [- (2AC + 2BD)d_1 - (2AC + BD)d_2 - \\ \quad 2(AC + BD)d_3 + 3\sqrt{3}RA - \sqrt{3}rA + \\ \quad 6mA^2 - 3mB]/(-5A) \end{cases}$$

1.5 工作空间

并联机构工作空间是指动平台参考点可达到的工作区域。假定该机构结构参数为: $R = 300 \text{ mm}$ 、 $r = 200 \text{ mm}$ 、 $m = 90 \text{ mm}$ 、 $\alpha = 15^\circ$ 、 $\beta = 30^\circ$ 。以动坐标系原点为参考点,根据位置正解表达式,应用 Matlab 软件编程,在 $0 \text{ mm} \leq d_1 \leq 600 \text{ mm}$ 、 $0 \text{ mm} \leq d_2 \leq 600 \text{ mm}$ 、 $0 \text{ mm} \leq d_3 \leq 600 \text{ mm}$ 范围内,基于蒙特卡洛法绘制出该机构的工作空间,如图 2 所示。

2 雅可比矩阵

并联机构的雅可比矩阵表示了操作空间与关节空间之间速度与力的传递关系,是并联机构性能分

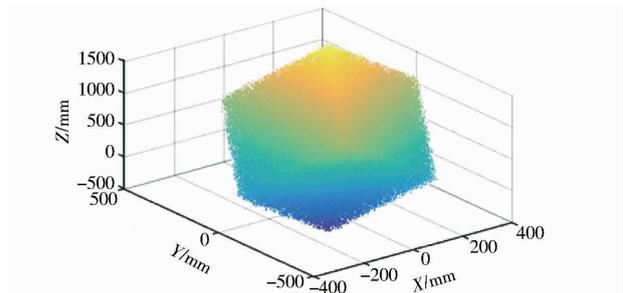


图 2 3-PRRR 并联机构工作空间

Fig. 2 Workspace of 3-PRRR parallel mechanism

析与评价的基础。基于螺旋理论,得到 3-PRRR 并联机构的雅可比矩阵求解公式^[20]

$$J = J_m^{-1} J_n \quad (6)$$

其中

$$J_m = \begin{bmatrix} L_{a1} & M_{a1} & N_{a1} \\ L_{a2} & M_{a2} & N_{a2} \\ L_{a3} & M_{a3} & N_{a3} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$J_n = \begin{bmatrix} \mathcal{S}_{b1} \circ \mathcal{S}_{a1} & 0 & 0 \\ 0 & \mathcal{S}_{b2} \circ \mathcal{S}_{a2} & 0 \\ 0 & 0 & \mathcal{S}_{b3} \circ \mathcal{S}_{a3} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中 L_{ai} 、 M_{ai} 、 N_{ai} ——分支传递螺旋轴线的方向数
 \mathcal{S}_{bi} ——分支传递力螺旋
 \mathcal{S}_{ai} ——分支主动螺旋

选取移动副作为主动副,将主动副刚化,求出分支的传递力螺旋

$$\mathcal{S}_{bi} = [0 \quad 1 \quad 0; \quad 0 \quad 0 \quad 0]$$

将分支的传递力螺旋在基坐标系中表示,可知传递力螺旋过 A_i 点沿 y_i 轴正向,与主动螺旋夹角为 β ,如图 3 所示。根据式(7)、(8)可求出

$$J_m = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}A & \frac{\sqrt{3}}{2}A & B \\ -\frac{1}{2}A & -\frac{\sqrt{3}}{2}A & B \\ A & 0 & B \end{bmatrix} \\ J_n = \begin{bmatrix} AC + BD & 0 & 0 \\ 0 & AC + BD & 0 \\ 0 & 0 & AC + BD \end{bmatrix}$$

根据式(6)求出 3-PRRR 并联机构的雅可比矩阵,分析可知当选取移动副作为主动输入时,该机构的雅可比矩阵仅决定于结构参数 α 和 β ,即 3-PRRR 并联机构在任何位姿下,雅可比矩阵保持恒定。

假定机构结构参数 $\alpha = 15^\circ$ 、 $\beta = 30^\circ$,在移动副作为主动输入情况下,假定各分支驱动速度方程为

$$\begin{cases} \dot{d}_1 = 10\sin(t + \pi/2) \\ \dot{d}_2 = 15\cos(2t) \\ \dot{d}_3 = 20\cos(t + \pi/3) \end{cases} \quad (9)$$

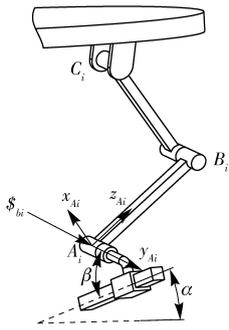


图3 分支传递力螺旋

Fig. 3 Limb transmission wrench screw

机构在不同位姿下,动平台输出的速度变化曲线如图4所示。其中, \dot{P}_{ij} ($i=1,2,3; j=X,Y,Z$) 表示动平台在第 i 种位姿下,沿 j 方向的移动速度。同样,保证结构参数不变,假定各分支驱动力方程为

$$\begin{cases} f_1 = 12\cos(t + \pi) \\ f_2 = 10\sin(t + \pi) \\ f_3 = 16\cos(t/2 + \pi/2) \end{cases} \quad (10)$$

机构在不同位姿下,动平台输出力变化曲线如图5所示。其中, f_{ij} ($i=1,2,3; j=X,Y,Z$) 表示动平台在第 i 种位姿下,沿 j 方向的输出力。

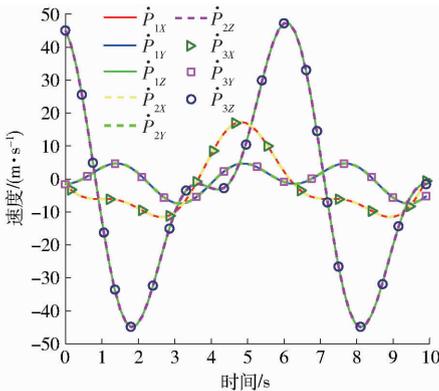


图4 动平台输出速度曲线

Fig. 4 Output speed curves of moving platform

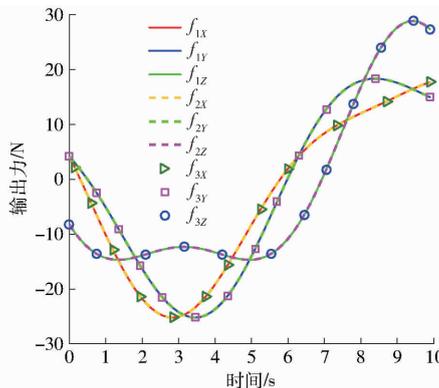


图5 动平台输出力曲线

Fig. 5 Output force curves of moving platform

当给定移动副确定的输入速度/力,该机构在不同位姿下,动平台沿 X,Y,Z 3 个方向的输出速度/

力曲线完全重合,从而验证了该机构雅可比矩阵恒定,即机构的输入与输出映射关系不因机构位姿的变化而改变。

3 3-PRRR 传递性能分析

3.1 功率传递性能分析

一般并联机构在不同位姿下,瞬时传递功率绝对值不同,并不能直接将瞬时功率作为评价并联机构传递性能的指标。因此在分析和评价并联机构的传递性能时,可采用能效系数进行分析,即并联机构的瞬时传递功率和理论上可能的最大传递功率之比定义为能效系数。而本文所提 3-PRRR 并联机构具有雅可比矩阵恒定的特性,在给定确定的输入情况下,机构具有恒定的传递功率,因此可用瞬时传递功率绝对值分析该机构的传递性能。

3-PRRR 并联机构分支传递功率可以用分支传递力螺旋和动平台运动螺旋的互易积表示。刚化 3-PRRR 并联机构第 2 和第 3 分支主动副,设第 1 分支主动副输入速度为 v ,即输入速度为 $\dot{d} = [v \ 0 \ 0]^T$,驱动力为 f ,根据定义分支传递功率为

$$W = \mathcal{S}_{b1} \circ \mathcal{S}_{o1} = S_{b1} J \dot{d} = fvP \quad (11)$$

式中 P ——单位输入下分支传递功率

\mathcal{S}_{o1} ——动平台运动螺旋

S_{b1} ——传递力螺旋的方向矢量

由式(11)得到,3-PRRR 并联机构的功率传递性能与 α 无关,仅决定于 β 。同样假定机构结构参数 $\alpha = 15^\circ$,分析传递功率随 β 的变化关系,计算 β 为 $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 和 90° 时的分支传递功率,得到数据如表 1 所示。

表 1 单位输入下分支传递功率与 β 对应

Tab. 1 Relationship between limb power and β under unit input

$\beta/(\circ)$	0	15	30	45	60	90
功率/($N \cdot mm \cdot s^{-1}$)	1.000	0.956	0.866	0.707	0.500	0

由表 1 分析可知,单位输入功率下分支传递功率随着 β 的增大而减小,当 $\beta = 0^\circ$ 时,即分支传递力螺旋与主动螺旋轴线平行时,分支的输入功率全部转为动平台的输出,此时该并联机构的功率传递性能最佳,当 $\beta = 90^\circ$ 时,分支不具备传递性能。

以下,将对 3-PRRR 并联机构进行整体功率传递性能分析。假定各分支驱动速度方程为

$$\begin{cases} \dot{d}_1 = 10\sin(2\theta) \\ \dot{d}_2 = 8\cos(2\theta + \pi/6) \\ \dot{d}_3 = 5\sin(\theta/2 + \pi/2) + 7 \end{cases} \quad (12)$$

在不同位姿下,分别得出 β 在 0° 、 15° 、 30° 和 60° 时的输入/传递功率曲线,如图 6~9 所示。计算 $\beta = 0^\circ$ 和 $\beta = 30^\circ$ 时的输入/传递功率,得到的数据如表 2、表 3 所示。

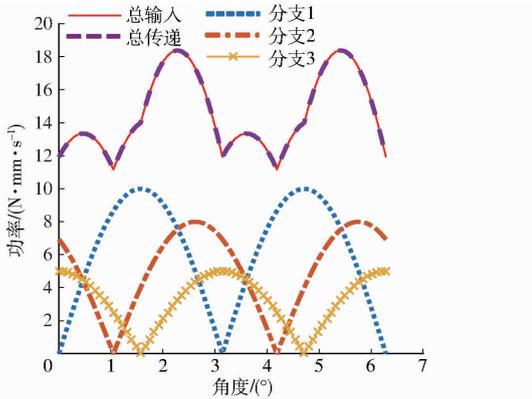


图 6 $\beta = 0^\circ$ 分支输入功率与传递功率

Fig. 6 Limb input power and transfer power at $\beta = 0^\circ$

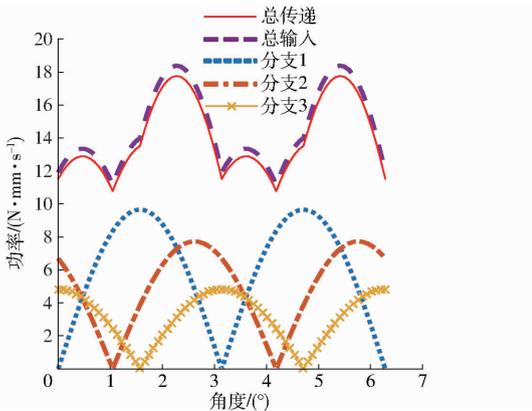


图 7 $\beta = 15^\circ$ 分支输入功率与传递功率

Fig. 7 Limb input power and transfer power at $\beta = 15^\circ$

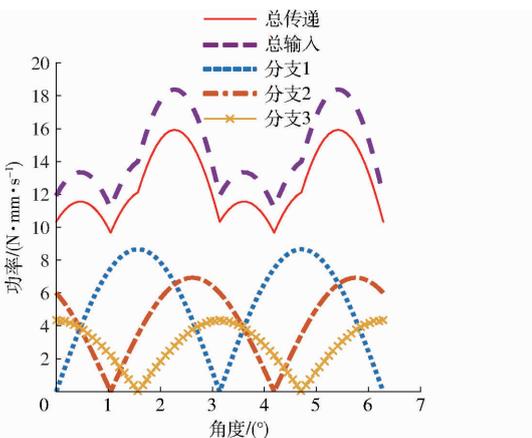


图 8 $\beta = 30^\circ$ 分支输入功率与传递功率

Fig. 8 Limb input power and transfer power at $\beta = 30^\circ$

由图 6~9 分析可知,3-PRRR 并联机构结构参数 α 不变时,随着 β 增加,各分支传递功率减小。比较表 2 和表 3 中数据,在相同总输入功率下, $\beta = 0^\circ$ 时机构传递性能优于 $\beta = 30^\circ$ 时的传递性能。同理,计算比较 β 为 $0^\circ \sim 90^\circ$ 内其他值时的输入/传递功率,得到 $\beta = 0^\circ$ 时该机构传递性能最佳。

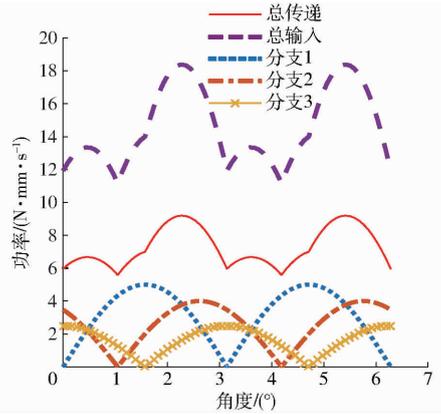


图 9 $\beta = 60^\circ$ 分支输入功率与传递功率

Fig. 9 Limb input power and transfer power at $\beta = 60^\circ$

表 2 $\beta = 0^\circ$ 分支输入功率与传递功率

Tab. 2 Limb input power and transfer power at $\beta = 0^\circ$

N · mm/s					
$\theta/(^\circ)$	第 1 分支	第 2 分支	第 3 分支	总传递功率	总输入功率
0	1.736 5	6.128 4	4.924 0	12.788 9	12.788 9
30	5.000 0	4.000 0	4.330 1	13.330 1	13.330 1
60	8.660 3	0	2.500 0	11.160 3	11.160 3
90	10.000 0	4.000 0	0	14.000 0	14.000 0
120	8.660 3	6.928 2	2.500 0	18.088 5	18.088 5

表 3 $\beta = 30^\circ$ 分支输入功率与传递功率

Tab. 3 Limb input power and transfer power at $\beta = 30^\circ$

N · mm/s					
$\theta/(^\circ)$	第 1 分支	第 2 分支	第 3 分支	总传递功率	总输入功率
0	0.868 2	3.064 2	2.462 0	6.394 4	12.788 9
30	2.500 0	2.000 0	2.165 1	6.665 1	13.330 1
60	4.330 1	0	1.250 0	5.580 1	11.160 3
90	5.000 0	2.000 0	0	7.000 0	14.000 0
120	4.330 1	3.464 1	1.250 0	9.044 2	18.088 5

3.2 速度与力传递性能分析

假定机构的结构参数 $\alpha = \pi/6$, 假定各分支驱动速度为

$$\begin{cases} d_1 = 2\sin(t + \pi/2) \\ d_2 = 5\cos(t/2) \\ d_3 = 6\cos(t + \pi/6) \end{cases} \quad (13)$$

根据式(6)~(8)求出 $\beta = 0^\circ$ 和 $\beta = 30^\circ$ 2 种情况下的雅可比矩阵,在此基础上,得到动平台的输出速度随时间的变化曲线,如图 10 所示。

在同一情况下,假定各个分支驱动力 f_i 方程为

$$\begin{cases} f_1 = 10\sin(t + \pi/2) \\ f_2 = 5\cos(t + \pi/3) \\ f_3 = 2\sin(2t + \pi/6) + 6 \end{cases} \quad (14)$$

当其在 $\beta = 0^\circ$ 和 $\beta = 30^\circ$ 时,动平台输出力随时间变化曲线如图 11 所示。

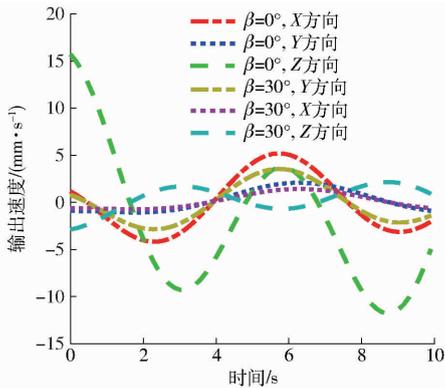


图10 动平台输出速度曲线

Fig. 10 Output speed curves of moving platform

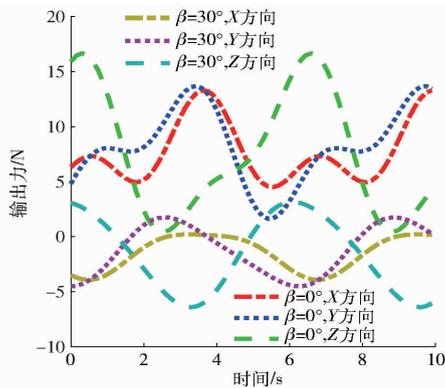


图11 动平台输出力曲线

Fig. 11 Output force curves of moving platform

由图10和图11分析可得:当给定移动副确定的输入速度/力后,该机构在不同 β 下,动平台 X 、 Y 、 Z 3个方向的输出速度/力变化曲线并不相同。对于同样的输入速度/力, $\beta=0^\circ$ 高于同一时刻下 $\beta=30^\circ$ 时的输出速度/力绝对值。同理,取 β 为 $0^\circ\sim 90^\circ$ 内其他值进行计算比较,得到 $\beta=0^\circ$ 时的输出速度/力绝对值最高,速度/力传递性能最佳。

4 结论

(1)提出了一种具有雅可比矩阵恒定特性的3-PRRR并联机构,基于传递力螺旋和主运动螺旋求解出机构的雅可比矩阵,分析并验证了移动副作为主动输入时,该并联机构具有雅可比矩阵恒定的特性。

(2)利用瞬时传递功率绝对值分析了3-PRRR并联机构的功率传递性能,得到机构功率传递性能最佳的条件。

(3)对3-PRRR并联机构进行运动速度/力传递特性分析,根据性能动平台输出速度/力曲线,得到该机构速度/力传递性能最佳的条件。

参 考 文 献

- MERLET J P. Parallel robots[M]. Solid mechanics and its applications. Dordrecht: Springer, 2006.
- 黄真, 赵永生, 赵铁石. 高等空间机构学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 118-227.
- 熊有伦. 机器人学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996: 153-155.
- GANESH S S, RAO A B K. Error analysis and optimization of a 3-degree of freedom translational parallel kinematic machine[J]. Frontiers of Mechanical Engineering, 2014, 9(2): 120-129.
- 张彦斌, 吴鑫, 刘宏昭, 等. 一种新型3-CRP移动并联机构的设计和运动分析[J]. 中国机械工程, 2008, 19(4): 435-438. ZHANG Yanbin, WU Xin, LIU Hongzhao, et al. Design and kinematical analysis of a novel translational parallel mechanism with 3-CRP limbs[J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(4): 435-438. (in Chinese)
- 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. SHEN Huiping, YANG Tingli, LIU Anxin, et al. A novel three-translational parallel mechanism and its position analysis[J]. China Mechanical Engineering, 2004, 15(20): 1853-1856. (in Chinese)
- 郭宗和, 孙术华, 郝秀清, 等. 3-PUU三维平动并联机器人的位置分析及其仿真[J]. 中国机械工程, 2006, 17(17): 1787-1789. GUO Zonghe, SUN Shuhua, HAO Xiuqing, et al. Position analysis and simulation of 3-PUU translational parallel manipulator[J]. China Mechanical Engineering, 2006, 17(17): 1787-1789. (in Chinese)
- 蒲志新, 李晓春, 由旭平, 等. 3-UPU并联机构运动学及工作空间研究[J]. 机械传动, 2016, 40(1): 12-13. PU Zhixin, LI Xiaochun, YOU Xuping, et al. Study on the workspace and kinematics of 3-UPU parallel mechanism[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2016, 40(1): 12-13. (in Chinese)
- 陈祥, 谢福贵, 刘辛军. 并联机构中运动/力传递功率最大值的评价[J]. 机械工程学报, 2014, 50(3): 1-9. CHEN Xiang, XIE Fugui, LIU Xinjun. Evaluation of the maximum value of motion/force transmission power in parallel manipulator[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(3): 1-9. (in Chinese)
- 李鹭扬, 吴洪涛. 并联机器人力传递性能分析[J]. 机械科学与技术, 2005, 24(10): 1176-1177. LI Luyang, WU Hongtao. Force transmissibility performance of parallel manipulators[J]. Mechanical Science and Technology, 2005, 24(10): 1176-1177. (in Chinese)
- 韩江义, 游有鹏, 王化明, 等. 并联机构力传递的分析[J]. 机器人, 2009, 31(6): 523-528. HAN Jiangyi, YOU Youpeng, WANG Huaming, et al. Analysis on force transmission of parallel mechanism[J]. Robot, 2009, 31(6): 523-528. (in Chinese)

- dimensional valve and a standard servo valve [J]. Proc. IMechE, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2013, 227(12): 2707 – 2723.
- 12 孟彬, 阮健, 李胜. 新型阀用耐高压旋转电磁铁特性研究 [J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(12): 240 – 245, 256. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20121243&journal_id = jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20121243&journal_id=jcsam) DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.12.043.
MENG B, RUAN J, LI S. Research on the characteristics of novel electromagnet with high pressure resistance for valve [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(12): 240 – 245, 256. (in Chinese)
- 13 满军. 耐高压高速开关电-机械转换器关键技术研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
MAN J. Research on key technology of high-pressure high-speed on-off electro-mechanical converter [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011. (in Chinese)
- 14 孟彬, 林琼, 阮健. 单相对称磁路湿式力矩马达研究 [J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(9): 406 – 412. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20160954&journal_id = jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160954&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.054.
MENG B, LIN Q, RUAN J. Research on torque motor with high pressure resistance based on symmetrical magnetic circuit with single phase excitation [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 406 – 412. (in Chinese)
- 15 崔剑, 丁凡, 李其朋, 等. 电液伺服转阀耐高压双向旋转比例电磁铁 [J]. 机械工程学报, 2008, 44(9): 230 – 235.
CUI J, DING F, LI Q P, et al. High-pressure bi-directional rotary proportional solenoid for rotary servo valve [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(9): 230 – 235. (in Chinese)
- 16 赵斌. 基于 MATLAB 的力矩马达的非线性数学建模 [J]. 煤矿机械, 2010, 31(7): 45 – 46.
ZHAO B. Torque motor based on MATLAB mathematical modeling of non-linear [J]. Coal Mine Machinery, 2010, 31(7): 45 – 46. (in Chinese)
- 17 李松晶, 鲍文. 磁流体对伺服阀力矩马达动态特性的影响 [J]. 机械工程学报, 2008, 44(12): 137 – 142.
LI S J, BAO W. Influence on dynamic characteristics of a hydraulic servo-valve torque motor due to magnetic fluids [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(12): 137 – 142. (in Chinese)
- 18 王宝龄. 电磁电器设计基础 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1989.
- 19 MERRITT H E. 液压控制系统 [M]. 陈燕庆, 译. 北京: 科学出版社, 1976.
- 20 刘慧娟, 上官明珠, 张颖超, 等. Ansoft Maxell 13 电机电磁场实例分析 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.

~~~~~  
(上接第 338 页)

- 12 王亿, 陈安军. 3-CU<sup>+</sup>并联机构运动和力传递性能分析 [J]. 机械传动, 2014, 38(1): 78 – 81.  
WANG Yi, CHEN Anjun. Analysis on movement and force transmission property of 3 – CU<sup>+</sup> parallel mechanism [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2014, 38(1): 78 – 81. (in Chinese)
- 13 LI Jianfeng, WANG Xinhua, FEI Renyuan, et al. Performance analysis and kinematic design of pure translational parallel mechanism with vertical guide-ways [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 19(2): 300 – 306.
- 14 WU C, LIU X J, WANG L, et al. Optimal design of spherical 5R parallel manipulators considering the motion/force transmissibility [J]. ASME Journal of Mechanical Design, 2010, 132(3): 031002.
- 15 LIU X J, WANG J, WU C, et al. Design of a 3-axis articulated tool head with parallel kinematics achieving desired motion/force transmission [J]. ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2010, 132(2): 92 – 102.
- 16 WU C, LIU X J, WANG J. Dimension optimization of an orientation fine-tuning manipulator for segment assembly device [J]. Automation in Construction, 2011, 20(4): 353 – 359.
- 17 XIE F, LIU X J, WANG J. A 3-DOF parallel manufacturing module and its kinematic optimization [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2012, 28(3): 334 – 343.
- 18 王飞博, 吴伟峰, 陈祥, 等. 基于运动/力传递特性的 1T2R 并联机构构型优选 [J]. 机械工程学报, 2014, 50(23): 20 – 28.  
WANG Feibo, WU Weifeng, CHEN Xiang, et al. Optimal type selection of 1T2R parallel mechanisms based on motion/force transmissibility [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(23): 20 – 28. (in Chinese)
- 19 王飞博, 陈巧红, 武传宇, 等. 2-UPR-SPR 并联机构尺度综合 [J]. 机械工程学报, 2015, 51(21): 24 – 32.  
WANG Feibo, CHEN Qiaohong, WU Chuanyu, et al. Dimensional synthesis of a 2 – UPR – SPR parallel manipulator [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(21): 24 – 32. (in Chinese)
- 20 JOSHI S A, TSAI L W. Jacobian analysis of limited-DOF parallel manipulators [J]. ASME Journal of Mechanical Design, 2002, 124(2): 254 – 258.