

双模融合 6-[(RPRRRP)R-R]US 并联机构运动学分析

陈宇航¹ 赵铁石^{2,3} 郭建纲¹ 陈丽媛¹ 郝增亮¹

(1. 北华航天工业学院机电工程学院, 廊坊 065000;
2. 燕山大学河北省并联机器人与机电系统实验室, 秦皇岛 066004;
3. 燕山大学先进锻压成形技术与科学教育部重点实验室, 秦皇岛 066004)

摘要: 针对工程上对不同性质的运动需要叠加融合的一类应用需求,设计一种能够实现双模式运动融合的 6-[(RPRRRP)R-R]US 型并联机构。阐述了将机构原驱动副 R 转换为 (RPRRRP)R-R 双输入子闭环机构的方法。对机构单模式工作和双模式融合工作分别进行运动学正、反解分析,提出两种双输入反解驱动分配策略,根据双输入子闭环和外层 6-RUS 机构特点分别采取二分法和牛顿法进行运动学正解运算,并给出求解流程图。通过数值算例,分别对单轴运动下的双模融合、多轴复合运动下的双模融合的反解运算以及双输入融合驱动下的正向运动学进行理论计算,并对不同情况下的算例进行运动学仿真,结果表明理论值与仿真值之差均在 10⁻⁶ 量级,证明了理论方法的正确性和有效性。该机构可应用于车载、船载以及星载设备的指向与稳定协同调节装置,提升载体设备的作业性能。

关键词: 并联机构; 双模融合; 子闭环; 运动学

中图分类号: TH112 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)05-0438-11 OSID: 

Kinematic Analysis of Dual-mode Fusion 6-[(RPRRRP)R-R]US Parallel Mechanism

CHEN Yuhang¹ ZHAO Tieshi^{2,3} GUO Jian'gang¹ CHEN Lihuan¹ HAO Zengliang¹

(1. School of Mechanical and Electrical, North China Institute of Aerospace Engineering, Langfang 065000, China
2. Hebei Provincial Key Laboratory of Parallel Robot and Mechatronic System, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China
3. Key Laboratory of Advanced Forging and Stamping Technology and Science, Ministry of Education, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: In many engineering applications, the fusion motion involving many components is required, each motion component has different properties. The different motion properties can be roughly divided into two types according to frequency and amplitude, namely, low frequency high amplitude and high frequency low amplitude, however, the commonly used driving device often works in only one mode. For this kind of application demand, a 6-[(RPRRRP)R-R]US parallel mechanism was designed to realize dual-mode motion fusion. The novel mechanism evolved from the typical 6-RUS configuration. The method of transforming the original driving pair R into (RPRRRP)R-R dual-input sub closed loop mechanism was discussed. The forward and inverse kinematics solutions of the novel mechanism under single motion component mode and two components fusion mode were analyzed respectively. Two kinds of strategies, which was for allocation of dual-input inverse solution, were proposed. The forward kinematics of the novel mechanism was divided into two steps: firstly, according to the characteristics of dual-input sub closed loop, dichotomy method was used; secondly, for the outer 6-RUS configuration, forward kinematics was conducted by means of Newton method. Flow charts of the two steps were given. Through numerical examples, theoretical calculations were carried out for the inverse solution of dual-mode fusion under uniaxial motion, inverse solution of dual-mode fusion under multi-axial composite motion and for the forward solution driven by dual-input fusion, meanwhile, the kinematics simulation of

收稿日期: 2021-12-03 修回日期: 2022-01-14
基金项目: 国家自然科学基金项目(51875496)和 NCIAE 博士科研启动基金项目(BKY-2020-30)
作者简介: 陈宇航(1986—),男,讲师,博士,主要从事并联机构与机器人技术研究,E-mail: yhchen1228@126.com
通信作者: 赵铁石(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事并联机构理论及其应用研究,E-mail: tszhao@ysu.edu.cn

numerical examples in different cases was carried out. The results showed that the difference between the theoretical value and the simulation value was on the order of 10^{-6} , the correctness and validity of the theoretical method were proved. The mechanism proposed can be used as the pointing and stability coordinate adjustment device of vehicle-borne, shipborne and space-borne equipment to improve the operation performance.

Key words: parallel mechanism; dual-mode fusion; sub closed-loop; kinematics

0 引言

多任务协同、多模式融合是机械装备发展的趋势。为应对复杂的实际应用,机构学领域涌现出一系列新颖的机构形式,如可重构机构、并联冗余自由度机构和含有子闭环的机构等。并且针对多模式并联机构、多任务融合机构、一机多用等方向开展了较多研究。

关于可重构机构、多模式机构等研究成果较多,戴建生团队^[1-2]首先阐述了变胞机构的机理和应用,并对相关研究进展进行了系统梳理;于靖军等^[3]论述了多模式机构的研究进展以及未来应用的可能;单彦霞等^[4]基于 TCI 指标提出一种能实现多模式机构操作模式平稳切换的方法。刘伟等^[5]基于自由度可变的混联支链综合了一类多模式机构,能实现 3 种运动模式间的变换。沈惠平等^[6]提出了一种动平台可重构的三自由度并联机构,具有部分运动解耦性。邹琦等^[7]设计了一种运用离合器与齿轮系配合完成机架重构过程的并联机构。石志新等^[8]采用方位特征集法对四自由度双模式机构展开综合,并对其中一种进行位置分析。具有冗余自由度的机构,运动输出具有更多可能性。QU 等^[9-10]提出一种具有冗余自由度的平面机构,并进行了运动学和奇异性分析;ZHAO 等^[11]提出一种具有冗余自由度的并联机构,由于运动的冗余特性使该机构具有非常大的转角工作空间;GOSSELIN 等^[12-14]先后提出一类新型的具有转动能力不受限制的平面冗余自由度并联机构,以及一类能够通过冗余特性消除奇异位形并增大转动工作空间的空间机构。在分支中引入子闭环机构,可以改善空间机构性能,并能够合理引入冗余自由度。LI 等^[15-16]对一类分支含子闭环的并联机构进行研究,通过在分支内引入子闭环综合一类少分支多自由度形式的并联机构,并为步行机器人设计了一种含闭环结构的支腿;朱小蓉等^[17]综合了一类分支中含有双驱动五杆闭环回路的并联机构,并提出了 7 种耦合度为 0 的回路。文献[18-19]面向调姿隔振应用,在并联机构的分支中引入子闭环机构使原机构具有冗余自由度,并通过子闭环实现高低频混合输入。

多模式机构更多关注不同模式间的切换,而多模式融合应用在实际工程中应用同样广泛,本文拓展多模式机构的范畴,设计一种分支内含有六杆子闭环输入单元的新型并联机构,通过解析与数值相结合的方法对机构进行运动学分析,以期实现“高频低幅值”与“低频大幅值”两种模式运动的融合。

1 机构形式

在 6-RUS 并联机构中,各分支转动副 R 为输入。通常对输入副 R 的实际驱动形式有电机直接驱动和四杆机构间接驱动,如图 1 所示直接驱动形式,运动学计算相对简单,但动力学性能较差;间接驱动形式,运动学分析较复杂,但动力性能较好。

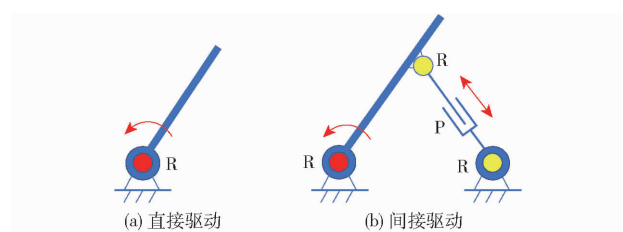


图 1 转动副 R 的驱动形式

Fig. 1 Driving forms of rotating pair R

为实现动平台双模融合运动,对驱动副 R 的驱动形式进行双模融合输入设计,其实现形式为在驱动副杆件的适当位置,通过另一个转动副 R' 与一个平面六杆子闭环机构 (RPRRRP) 连接,构成双输入单元如图 2 所示;也可以将该设计理解为将驱动副 R 替换为一个局部并联机构,该局部并联机构包含一个驱动分支和一个约束分支,其中约束分支只包含一个 R 副,驱动分支为包含一个平面六杆机构的混联分支,形式为 (RPRRRP)R。

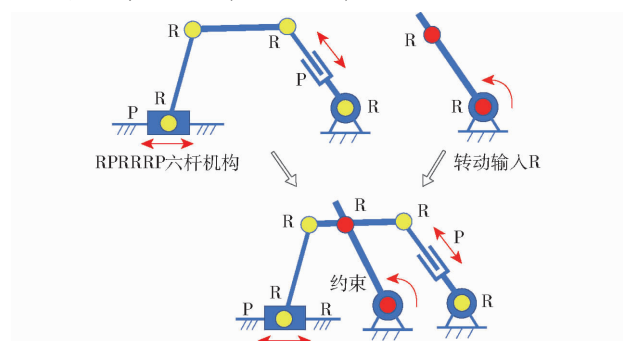


图 2 双输入单元组成原理

Fig. 2 Dual-input unit composition principle

根据 Kutzbach - Grübler 公式^[20] 计算可得 (RPRRRP)R - R 双输入单元的自由度为 2,需要两个输入,机构才能有确定运动。以两个 P 副为实际输入,它们分别对应两种运动模式的驱动,因此通过双输入单元的输出杆可实现双模运动融合。

通过上述方法实现双模融合输入后,机构形式为 6 - [(RPRRRP)R - R]US,如图 3 所示。显然双输入局部并联机构的输出杆件即为原 6 - RUS 机构的原动件,且运动形式仍为原输入副 R 的转动,因此对于动平台,约束形式与 6 - RUS 相同,所以动平台仍能实现空间六自由度运动。对于 6 - RUS 机构,此时驱动副 R 的输入中包含两种成分,分别对应双输入子闭环中两种性质的驱动,可根据应用需求进行组合。每个 [(RPRRRP)R - R]US 分支需要双输入,总体机构才能具有确定运动,因此 6 - [(RPRRRP)R - R]US 并联机构自由度数为 12,输入数大于末端构件自由度,属于运动冗余并联机构。

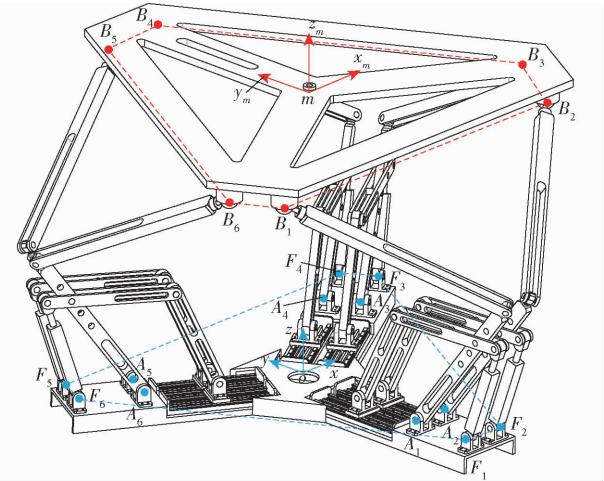


图 3 机构形式及坐标系

Fig. 3 Mechanism form and coordinate system

对该机构的分析,可以将机构划分为内、外两层,内层机构:(RPRRRP)R - R 双输入子闭环机构;外层机构:6 - RUS。内、外层机构通过共同的 R 副实现运动和力的传递。

2 单模式机构运动学反解分析

机构由动平台、基座和 6 条形式相同的分支组成,每条分支与上平台通过球副连接,铰接点记为 B_i ,其中 i 为分支标号, $i = 1, 2, \dots, 6$;分支底部与基座通过 2 个 R 副和 1 个 P 副连接,其中 2 个 R 副的铰接点记为 A_i, F_i 。在 A_i, F_i 所在平面的几何中心建立基坐标系 $\{o\}$,在 B_i 所在平面的几何中心建立动平台坐标系 $\{m\}$,如图 3 所示。

每个分支中包含两个驱动副,通过锁定其中一

个驱动,可让机构工作于单一运动模式,以灵活适应不同应用场景。

双输入子闭环机构简图如图 4 所示,将左侧移动副设定为调姿驱动,对应一类低频大行程驱动器,例如电动缸、液压缸等;右侧水平移动副设为振动驱动,对应一类高频小行程驱动器,如作动器、高频直线电机等。

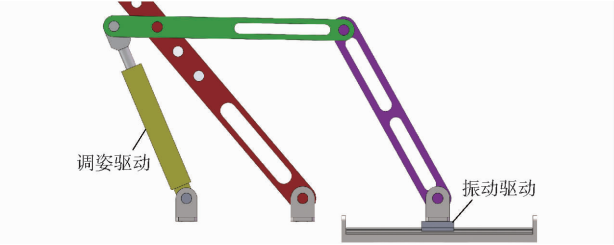


图 4 双输入子闭环三维图

Fig. 4 Dual-input sub closed loop 3D diagram

2.1 调姿模式运动学反解

当振动驱动被锁定,机构仅实现低频小幅值的位姿运动。机构的运动学反解分为两步:①对外层 6 - RUS 并联机构进行反解求得各分支输入角 θ_i 。②建立内层驱动子闭环的运动学方程,根据 θ 求得实际驱动 l_1 。

步骤(1):不考虑驱动子闭环 RPRRRP,外层机构形式为 6 - RUS,分支简图如图 5 所示,建立分支坐标系 $\{i\}$,R 副与基座铰接点 A_i 为坐标原点。

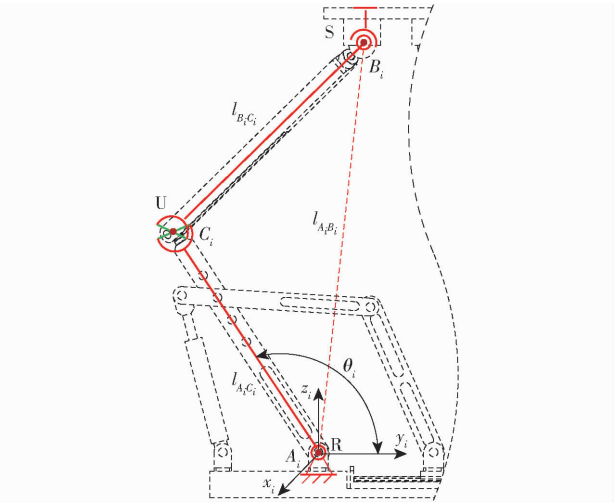


图 5 RUS 单分支简图

Fig. 5 Simple diagram of single branch of RUS

根据杆长约束关系可得

$$\theta_i = \arctan \frac{z_{B_i}}{y_{B_i}} \pm \arccos \frac{\lambda_i}{\sqrt{y_{B_i}^2 + z_{B_i}^2}} \quad (1)$$

其中

$$\lambda_i = \frac{l_{A_i C_i}^2 + l_{A_i B_i}^2 - l_{B_i C_i}^2}{2l_{A_i C_i}} \quad (2)$$

式中 $l_{A_i B_i}, l_{A_i C_i}, l_{B_i C_i}$ ——杆 $A_i B_i, A_i C_i, B_i C_i$ 的长度
 $x_{B_i}, y_{B_i}, z_{B_i}$ ——铰链点 B_i 的坐标

步骤(2): 双输入单元机构简图如图6所示。由于任意分支内双输入单元的计算过程相同, 为了表达式简洁, 除驱动变量外, 其余忽略分支下角标*i*。

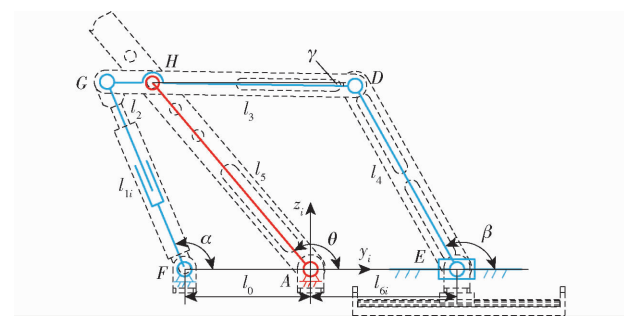


图6 双输入子闭环机构简图

Fig. 6 Mechanism diagram of dual-input sub closed loop

图6中, l_{1i} 、 l_{6i} ($i=1, 2, \dots, 6$) 是两个驱动尺寸, 即第*i*分支内 FG 、 AE 长度, l_0 、 l_2 、 l_3 、 l_4 、 l_5 分别为杆 FA 、 GH 、 HD 、 DE 、 AH 的长度, α 为 FG 与水平方向夹角, β 为杆 DE 与水平方向夹角, γ 为杆 GD 与水平方向夹角。在调姿运动模式下, l_1 是变量, l_6 是定值。

根据几何关系建立双输入子闭环机构的矢量封闭方程

$$l_5 + l_3 = l_{6i} + l_4 \quad (3)$$

解得

$$\beta = 2 \arctan \frac{k_{u2} \pm \sqrt{k_{u1}^2 + k_{u2}^2 - k_{u3}^2}}{k_{u1} - k_{u3}} \quad (4)$$

其中

$$\begin{cases} k_{u1} = 2l_{6i}l_4 - 2l_4l_5 \\ k_{u2} = -2l_4l_5 \sin \theta \\ k_{u3} = l_{6i}^2 + l_4^2 + l_5^2 - l_3^2 - 2l_{6i}l_5 \cos \theta \end{cases} \quad (5)$$

式中 k_{u1} 、 k_{u2} 、 k_{u3} ——中间系数

点 D 和点 H 坐标为

$$\begin{cases} y_D = l_{6i} + l_4 \cos \beta \\ z_D = l_4 \sin \beta \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} y_H = l_5 \cos \theta \\ z_H = l_5 \sin \theta \end{cases} \quad (7)$$

$$\text{令 } \frac{z_D - z_H}{y_D - y_H} = \frac{z_H - z_G}{y_H - y_G} = \frac{z_D - z_G}{y_D - y_G} = K \quad (8)$$

式中 y_G ——点 G 的 y 轴坐标

z_G ——点 G 的 z 轴坐标

K ——杆 GD 斜率

由杆长 l_2 约束关系可得

$$\begin{cases} y_G = l_5 \cos \theta - \frac{l_2}{\sqrt{K^2 + 1}} \\ z_G = l_5 \sin \theta - \frac{Kl_2}{\sqrt{K^2 + 1}} \end{cases} \quad (9)$$

驱动量尺寸 FG 的长度关系式为

$$l_{1i} = \sqrt{(y_G + l_0)^2 + z_G^2} \quad (10)$$

将式(8)、(9)所求值代入式(10), 即求得此时

的实际驱动量 l_{1i} 。

2.2 振动模式运动学反解

当调姿驱动被锁定, 机构输出六维振动。此时图6中, l_{1i} 是固定值, l_{6i} 是变量。其运动学反解同样分两步, 步骤1与调姿模式相同, 参照式(1); 步骤2为根据 θ 求得实际驱动 l_{6i} 。

类似调姿运动求解过程可得 α 与 θ 的关系式为

$$\alpha = 2 \arctan \frac{k_{v2} \pm \sqrt{k_{v1}^2 + k_{v2}^2 - k_{v3}^2}}{k_{v1} - k_{v3}} \quad (11)$$

其中

$$\begin{cases} k_{v1} = -2l_{1i}(l_0 + l_5 \cos \theta) \\ k_{v2} = -2l_{1i}l_5 \sin \theta \\ k_{v3} = l_0^2 + l_5^2 + l_{1i}^2 - l_2^2 + 2l_0l_5 \cos \theta \end{cases} \quad (12)$$

式中 k_{v1} 、 k_{v2} 、 k_{v3} ——中间系数

点 D 坐标表示为

$$\begin{cases} y_D = l_5 \cos \theta + \frac{l_3}{\sqrt{K^2 + 1}} \\ z_D = l_5 \sin \theta + \frac{Kl_3}{\sqrt{K^2 + 1}} \end{cases} \quad (13)$$

由约束方程 $(y_D - l_{6i})^2 + z_D^2 = l_4^2$ 可得

$$l_{6i} = y_D \mp \sqrt{l_4^2 - z_D^2} \quad (14)$$

当动平台位姿已知, 由步骤(1)求得外层机构 6-RUS 驱动角 θ_i , 然后根据式(11)、(13)依次求得角 α 和点 D 坐标, 最后通过式(14)解得振动模式的驱动输入 l_{6i} 。

3 双模式融合运动学反解分析

机构进行双模融合运动时, 驱动输入个数为12, 动平台输出运动自由度数为6, 属于自由度冗余机构。对于给定位姿, 可以得到无穷多组反解。结合一般实际应用工况, 设定两种反解求解策略, 使得到的反解具有更为明确的实际意义, 具体如下:

任意时刻 t , 动平台输出的融合运动位姿, 可分解为两种成分: 低频大范围的位姿运动和高频小幅值的振动, 即

$$\mathbf{W}(t) = \mathbf{W}_u(t) + \mathbf{W}_v(t) \quad (15)$$

式中 $\mathbf{W}$ ——双模式融合运动位姿

$\mathbf{W}_u$ ——位姿运动成分

$\mathbf{W}_v$ ——振动成分

双模融合运动可理解为一种平衡位置不断改变的振动, 变化的平衡位置即是位姿运动。因此在反解计算中, 可以设定两种驱动求解分配策略:

(1) 先 $\mathbf{W}_u(t)$ 后 $\mathbf{W}_v(t)$: 先求平衡位置后叠加振动

先求解任意时刻 t 平衡位置 $\mathbf{W}_u(t)$ 的对应的反解输入, 即调姿输入, 再以 $\mathbf{W}_u(t)$ 为当前平衡位置,

求解机构从 $\mathbf{W}_u(t)$ 运动到 $\mathbf{W}(t)$ 的位姿反解,即振动输入,过程如下:

假定各分支内振动输入 l_{6i} 在驱动中位锁定, l_{6i} 的中位值作为求解 l_{1i} 时一项固定的结构参数。以 $\mathbf{W}_u(t)$ 为目标位姿计算任意时刻 t 调姿输入的值,即

$$\mathbf{L}_1(t) = \mathbf{L}_1(0) + \mathbf{u}(t)$$

(16)

其中

$$\begin{cases} \mathbf{L}_1 = [l_{11} & l_{12} & \cdots & l_{16}]^T \\ \mathbf{u} = [u_1 & u_2 & \cdots & u_6]^T \end{cases}$$

(17)

式中 $\mathbf{L}_1$ ——调姿输入矢量
 $\mathbf{u}$ ——调姿输入增量矢量
 u_i —— l_{1i} 的增量

以 $\mathbf{W}_u(t)$ 为当前位姿, $\mathbf{W}_u(t) + \mathbf{W}_v(t)$ 为目标位姿, $\mathbf{L}_1(t)$ 为结构参数,根据振动模式的反解过程计算该 t 时刻振动驱动尺寸为

$$\mathbf{L}_6(t) = \mathbf{L}_6(0) + \mathbf{v}(t)$$

(18)

其中

$$\begin{cases} \mathbf{L}_6 = [l_{61} & l_{62} & \cdots & l_{66}]^T \\ \mathbf{v} = [v_1 & v_2 & \cdots & v_6]^T \end{cases}$$

(19)

式中 $\mathbf{L}_6$ ——振动输入矢量
 $\mathbf{v}$ ——振动输入增量矢量
 v_i —— l_{6i} 的增量

在求 $\mathbf{L}_6$ 的过程中, $\mathbf{L}_1$ 为时变结构参数, t 时刻对应的值为 $\mathbf{L}_1(t)$ 。

(2) 先 $\mathbf{W}_v(t)$ 后 $\mathbf{W}_u(t)$: 先求振动再改变平衡位置

以初始位置为平衡位,求解任意时刻 t 的振动位姿 $\mathbf{W}_v(t)$ 所对应的输入,即振动输入,再求每一时刻,机构从 $\mathbf{W}_v(t)$ 运动到 $\mathbf{W}_u(t) + \mathbf{W}_v(t)$ 对应的反解输入,即调姿输入。该策略为策略(1)的对偶过程,具体步骤为:

先锁定 $\mathbf{L}_1$ 以其为固定参数,并以 $\mathbf{W}_v(t)$ 为目标位姿,计算任意时刻振动输入 $\mathbf{L}_6(t)$,再以 $\mathbf{L}_6(t)$ 为瞬时结构参数, t 时刻,以 $\mathbf{W}_v(t)$ 为初始形位, $\mathbf{W}(t)$ 为目标形位计算 $\mathbf{L}_1(t)$ 。

需要注意两点:①两种求解策略的先后顺序仅是计算逻辑的先后,实际操作时,任意时刻计算得到 $\mathbf{L}_1(t)$ 和 $\mathbf{L}_6(t)$ 后,两者同时输入系统。②相同位姿下,两种策略计算的双输入结果不同,设定的两种策略所解算出的是机构无穷多组解中的两组,但调姿输入和振动输入各自的反解模型不变。

4 机构运动学正解分析

已知机构的实际输入 $\mathbf{L}_1(t)$ 、 $\mathbf{L}_6(t)$,求动平台的位姿 $\mathbf{W}(t)$ 为机构正解。由于各分支内存在子闭环机构,因此机构正解同样需要分两步完成。

(1) 内层子闭环机构正解

任意分支 i 内,外层机构 6-RUS 的分支驱动角 θ_i 是关于 l_{1i} 、 l_{6i} 的函数,然而 $\theta_i = f(l_{1i}, l_{6i})$ 的解析解难以获得。因此采用数值方法求取。当 l_{1i} 确定, θ_i 随 l_{6i} 变化呈单调递增关系,因此可以把 l_{1i} 先给定,采用二分法迭代对比 l_{6i} ,最终获得满足误差允许要求的解。求解过程如图 7 所示。

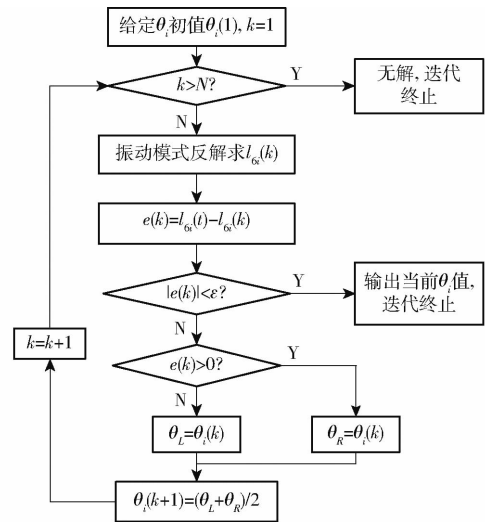


图 7 内层子闭环正解流程图

Fig. 7 Process of positive solution in sub-closed loop

图 7 中, N 为最大迭代次数; $e(k)$ 为 l_{6i} 第 k 次迭代误差, θ_L 、 θ_R 为当前循环下 θ_i 取值的边界; ϵ 为设定的求解精度。

(2) 外层 6-RUS 机构正解

根据各分支子闭环内实际驱动,通过步骤(1)求得子闭环输出杆的转角 θ ,即外层 6-RUS 机构分支的驱动角。对于 6-RUS 机构,全部输入 θ_i 已知,求动平台的位姿 $\mathbf{W}(t)$,为机构正解过程。

$\mathbf{q} = [\theta_1 \quad \theta_2 \quad \cdots \quad \theta_6]^T$ 为 6-RUS 机构广义输入矢量,联立式(1)所表示的 6 个分支的约束方程,得方程组

$$\mathbf{q} = f(\mathbf{W})$$

(20)

方程组(20)为非线性方程组,根据输入 $\mathbf{q}$ 求位姿 $\mathbf{W}$,解析方法难以求解,因此考虑采用数值法。为了让求解过程快速收敛,可采用牛顿法^[21],迭代方程为

$$\mathbf{W}_{k+1} = \mathbf{W}_k + G(\mathbf{W}_k) \mathbf{q}_{\Delta k}$$

(21)

其中

$$\mathbf{q}_{\Delta k} = \mathbf{q} - f(\mathbf{W}_k)$$

(22)

式中 $\mathbf{W}_k$ ——第 k 次迭代位姿
 $\mathbf{q}_{\Delta k}$ —— $\mathbf{q}$ 的第 k 次迭代误差
 G ——机构一阶影响系数

外层 6-RUS 机构正解流程如图 8 所示。

5 数值算例与仿真

通过理论模型计算和运动学仿真分别对上述

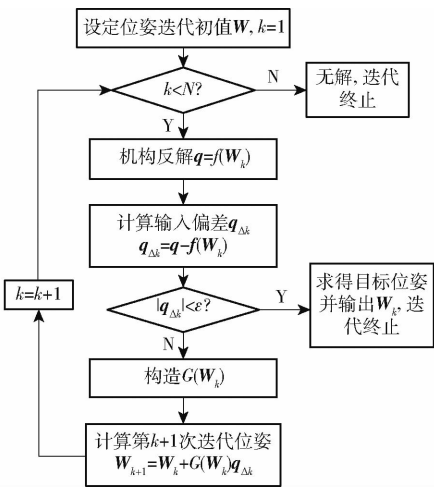


图 8 6-RUS 机构正解流程图

Fig. 8 Process of forward solution of 6-RUS mechanism

理论分析正确性进行验证。不同的反解分配策略得到仅是无穷解中的一组,因此只需按一种策略进行验证即可,本文按先 $W_u(t)$ 后 $W_v(t)$ 策略进行。

5.1 机构结构参数

动平台与基座铰链点尺寸如图 9 所示。

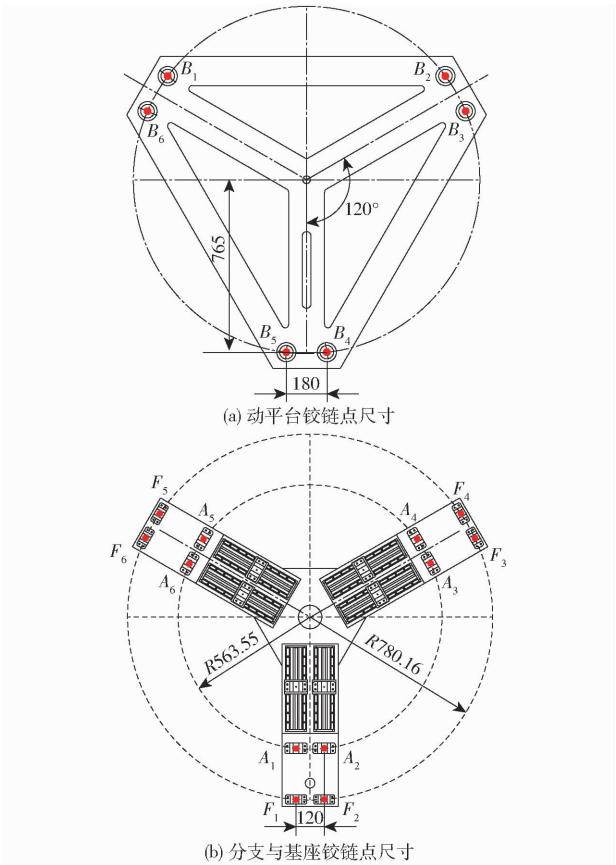


图 9 铰链点分布尺寸图

Fig. 9 Distribution dimension diagram of hinge points

驱动分支内各杆件尺寸见表 1。

根据上述参数建立机构三维模型,并导入 ADAMS 中进行运动学仿真。

表 1 杆件尺寸参数

Tab. 1 Dimensional parameters of each rod								mm
参数	l_0	l_2	l_3	l_4	l_5	$l_{A_iC_i}$	$l_{B_iC_i}$	
数值	217.5	81	349	360	420	602.5	820	

5.2 单自由度运动融合算例

首先验证机构在单一输出自由度方向上的运动融合能力,机构具有 6 个输出自由度,分别为 3 转动和 3 移动,任取其中 2 个单自由度运动作为数值算例。不失一般性,选取 x 轴方向转动和 y 轴方向转动为例。

(1) 绕 x 轴方向转动

给定动平台单轴双模融合运动规律为

$$W(t) = [r_x(t) \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \tag{23}$$

其中 $r_x(t) = r_{1x}(t) + r_{2x}(t) \tag{24}$

式中 r_x —— x 轴角位移

r_{1x} —— x 轴角位移位姿运动分量

r_{2x} —— x 轴角位移振动分量

取 $r_{1x}(t) = 10^\circ \sin(0.4\pi t)$, $r_{2x}(t) = 1^\circ \sin(2\pi t)$,按先 $W_u(t)$ 后 $W_v(t)$ 规则,计算 $l_{i1}(t)$ 和 $l_{6i}(t)$ 的驱动增量 $u(t)$ 和 $v(t)$,理论值如图 10 所示。

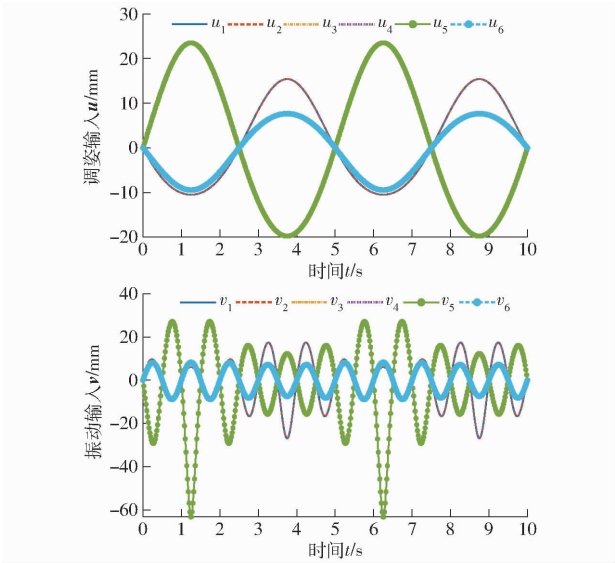


图 10 绕 x 轴转动时双输入理论值

Fig. 10 Dual-input theoretical value of x -axis rotation

绕 x 轴转动时,容易判断分支 1、2,分支 3、6 和分支 4、5 的驱动规律两两相同,因此图 10 中 6 条分支的驱动曲线两两覆盖,呈现 3 种规律。双模融合机构的运动学仿真需要通过 2 次仿真来验证。第 1 次,设定动平台运动规律为 $r_{1x}(t)$,并且令 $v(t) = 0$,仿真后测量 $u(t)$ 的变化规律;第 2 次,设定动平台运动为 $r(t)$,并将上一次仿真所得数据 $u(t)$ 作为已知条件给入系统,仿真后测量 $v(t)$ 。两次仿真得到的输入增量 $u(t)$ 和 $v(t)$ 的变化曲线如图 11 所示。

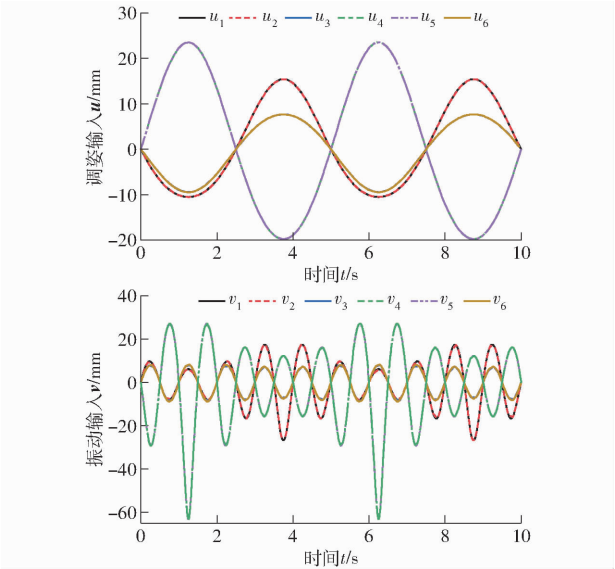


图 11 绕 x 轴转动时双输入仿真值

Fig. 11 Dual-input simulation value of x-axis rotation

对比图 10 和图 11 可知,理论计算值与仿真值的变化趋势一致。进一步精确对比,将仿真数据导出并与每一时刻的理论计算值作差,得双输入偏差曲线,如图 12 所示。

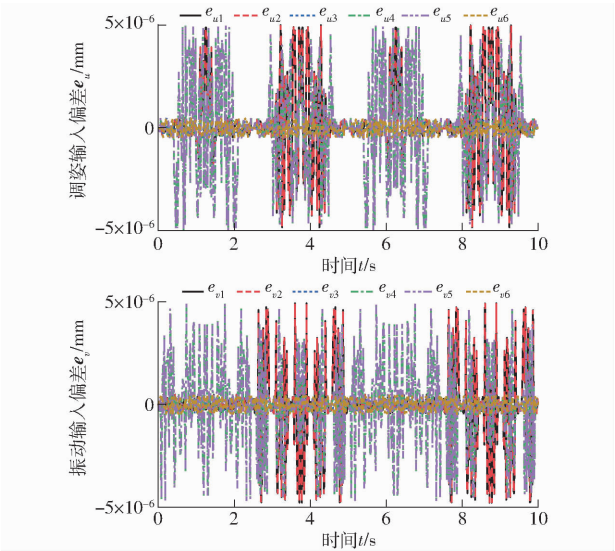


图 12 绕 x 轴转动时理论与仿真输入偏差

Fig. 12 Input deviation between theory and simulation of x-axis rotation

图 12 中, e_u 、 e_v 分别为调姿输入偏差和振动输入偏差, $e_u = [e_{u1} \ e_{u2} \ \cdots \ e_{u6}]^T$, $e_v = [e_{v1} \ e_{v2} \ \cdots \ e_{v6}]^T$, e_{ui} 、 e_{vi} 为第 i 分支的调姿输入和振动输入偏差,从图 12 可知,动平台绕 x 轴进行单自由度的双模融合运动时,理论计算输入值与仿真输入值的偏差在 10^{-6} 量级,可以认定理论值与仿真值完全一致。

(2) 绕 y 轴方向转动

给定绕 y 轴转动的双模融合运动规律为

$$\mathbf{W}(t) = [0 \ r_y(t) \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad (25)$$

其中 $r_y(t) = r_{1y}(t) + r_{2y}(t) \quad (26)$

式中 r_y ——y 轴角位移

r_{1y} ——y 轴角位移位姿运动分量

r_{2y} ——y 轴角位移振动分量

取 $r_{1y}(t) = 8^\circ \sin(2\pi t/3)$, $r_{2y}(t) = 0.5^\circ \sin(4\pi t)$ 。同样按先 $\mathbf{W}_u(t)$ 后 $\mathbf{W}_v(t)$ 计算 $\mathbf{u}(t)$ 和 $\mathbf{v}(t)$ 的理论值,如图 13 所示。

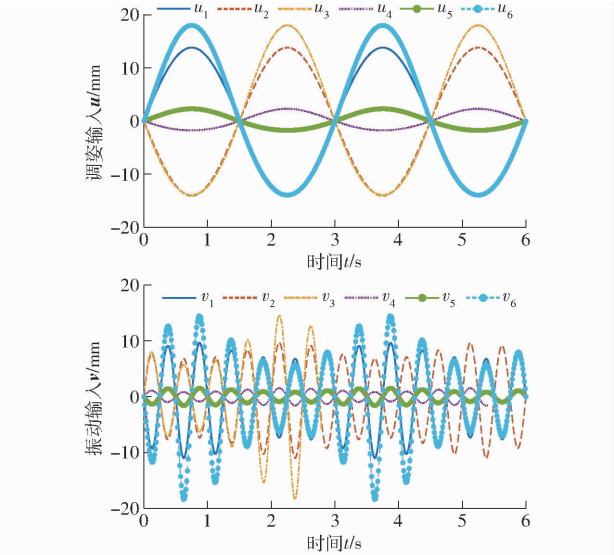


图 13 绕 y 轴转动时双输入理论值

Fig. 13 Dual-input theoretical value of y-axis rotation

以相同运动规律在 ADAMS 中仿真,仿真同样需要两次,得仿真结果如图 14 所示。

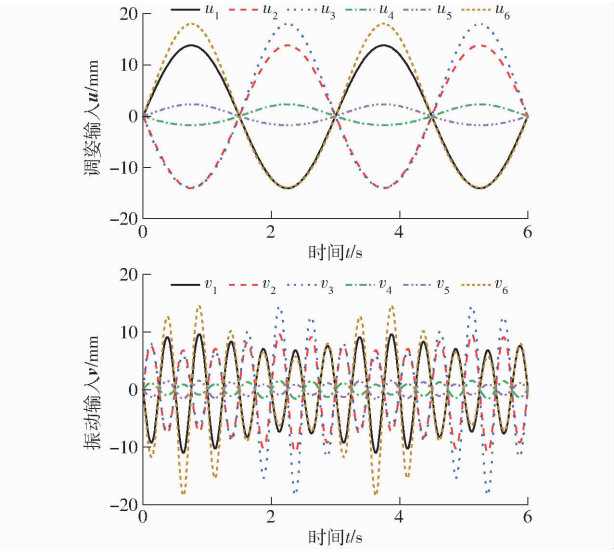


图 14 绕 y 轴转动时双输入仿真值

Fig. 14 Dual-input simulation value of y-axis rotation

对比图 13、14 可知,理论计算与仿真结果曲线变化规律基本一致。进一步精确验证,同样作出理论计算与仿真结果的偏差曲线如图 15 所示。

图 15 中偏差数据同样为 10^{-6} 量级,再次证明机构输出单自由度的融合运动时,理论值与仿真值

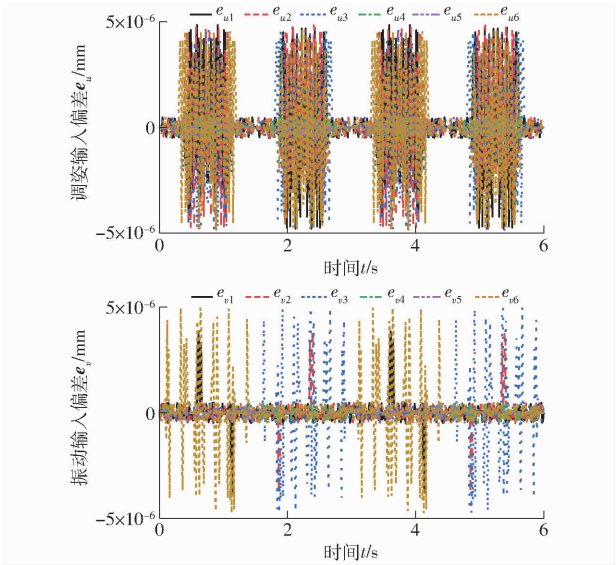


图 15 绕 y 轴转动时理论与仿真输入偏差
Fig. 15 Input deviation between theory and simulation
of y-axis rotation

完全一致。通过以上两个算例可以证明,机构反解的理论模型对于单自由度运动是正确的。

5.3 多自由度运动融合算例

单自由度运动形式相对简单,为了充分证明运动学理论模型的正确性,需对多自由度复合运动下的双模式融合运动进行算例验证。不失一般性,两转一移自由度具有广泛的应用性,因此以 z 轴方向移动、x 和 y 轴方向转动进行运动复合,每个自由度上实现两种模式运动的融合。各自由度方向的运动规律为 $U_m \sin\left(\frac{2\pi}{T_{um}}t\right) + V_m \sin\left(\frac{2\pi}{T_{vm}}t\right)$, 其中 U_m 为 m 轴向低频运动幅值, V_m 为 m 轴向高频运动幅值, T_{um} 为 m 轴向低频运动周期, T_{vm} 为 m 轴向高频运动周期, m 分别取 r_x 、 r_y 和 p_z , p_z 为沿 z 轴的位移。各参数的具体值见表 2。

表 2 融合运动参数

Tab.2 Fusion motion parameters

m	U_m	V_m	T_{um}/s	T_{vm}/s
r_x	6°	1°	5	1
r_y	5°	0.5°	4	0.5
p_z	10 mm	1 mm	5	0.2

根据给定的运动规律,并按先 $W_u(t)$ 后 $W_v(t)$ 规则,通过理论模型计算得双输入曲线如图 16 所示。以同样的运动规律和求解规则,运用 ADAMS 仿真得输入曲线如图 17 所示。计算、仿真过程与单自由度算例相似。

对比图 16、17 可知,三轴复合下,平台进行双模融合运动,输入理论计算值与仿真值变化趋势一致。导出理论值与仿真值数据,两者作差,并绘制偏差曲线如图 18 所示。

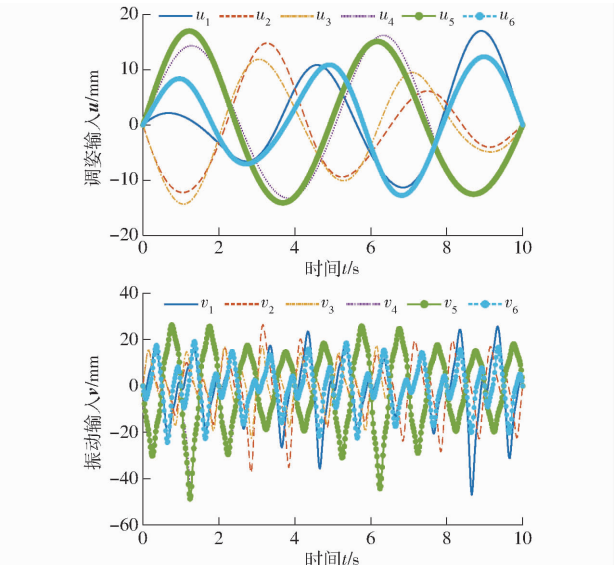


图 16 三轴复合下双模融合运动输入理论值
Fig. 16 Theoretical values of inputs with dual-mode
fusion motion under triaxial composite

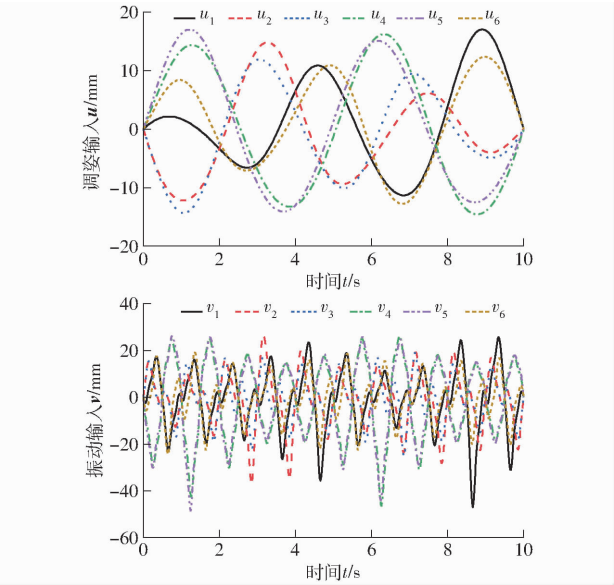


图 17 三轴复合下双模融合运动输入仿真值
Fig. 17 Simulation values of inputs with dual-mode
fusion motion under triaxial composite

由图 18 可知,任意时刻理论计算与仿真结果的偏差均在 10^{-6} 量级,可以认定理论结果与仿真结果完全相同。证明运动学反解理论模型对于多自由度复合下的双模融合运动同样正确。

5.4 运动学正解算例与仿真

机构输入规律已知,求机构末端动平台输出位姿为机构的正解。根据第 4 节,首先设定各分支双输入 u_i 、 v_i 的函数形式皆为 $Q \sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right)$, Q 为驱动幅值, T 为驱动周期。

根据上述关系,任意给定一组各输入的幅值和周期,参数如表 3、4 所示。

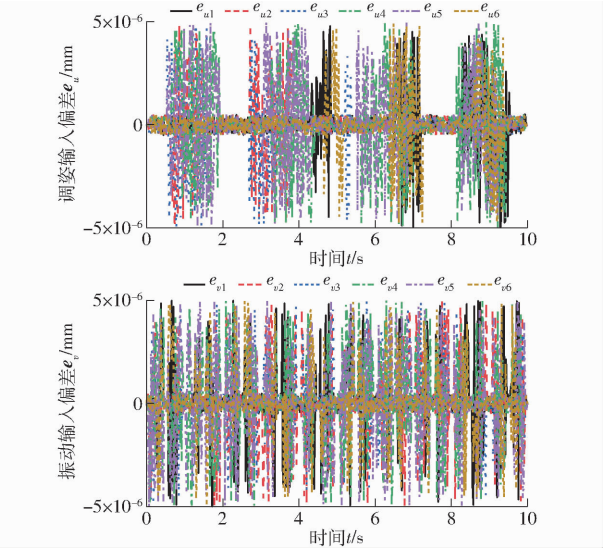


图 18 三轴复合下双模融合运动输入偏差
Fig. 18 Input deviationof dual-mode fusion motion under triaxial composite

表 3 调姿输入参数

Tab.3 Attitude adjustment input parameters

分支	Q/mm	T/s
1	11	5
2	10	4
3	12	10
4	6	6
5	8	9
6	3	8

表 4 振动输入参数

Tab.4 Vibration input parameters

分支	Q/mm	T/s
1	9	2
2	7	1
3	7	1.5
4	4	0.5
5	10	2
6	20	3

根据运动学正解的理论运算流程,在双输入融合驱动下,动平台的 6 维位姿输出曲线如图 19 所示,其中, r_x 、 r_y 、 r_z 为按 $x-y-z$ 顺序欧拉角测量, r_z 为 z 轴角位移; p_x 和 p_y 分别表示 x 轴位移和 y 轴位移。并将同样的驱动规律给入仿真模型,仿真后测量动平台的位姿输出,方位度量规则以及位置测量参考点与理论计算保持一致,测量结果如图 20 所示。

从图 19、20 可以看出,每个自由度上的运动均呈现大幅值上叠加小幅值的规律,证明机构能够把双输入子闭环内的两个独立的输入进行融合,并在输出运动上得以体现。对比理论结果和仿真结果,可以看出,动平台输出运动的规律是一致的。进一步精确对比,将仿真结果导出,并与理论计算值作

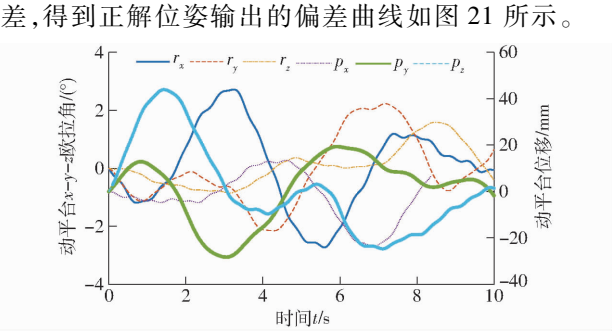


图 19 动平台位姿理论值
Fig. 19 Theoretical posture of moving platform

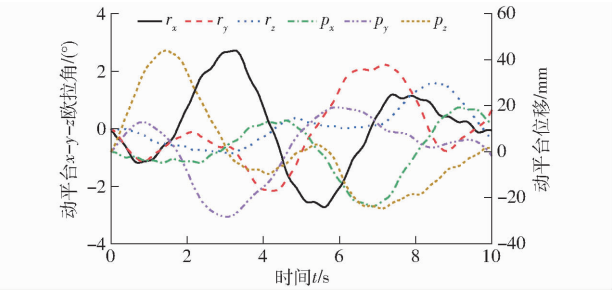


图 20 动平台位姿仿真值
Fig. 20 Simulation posture of moving platform

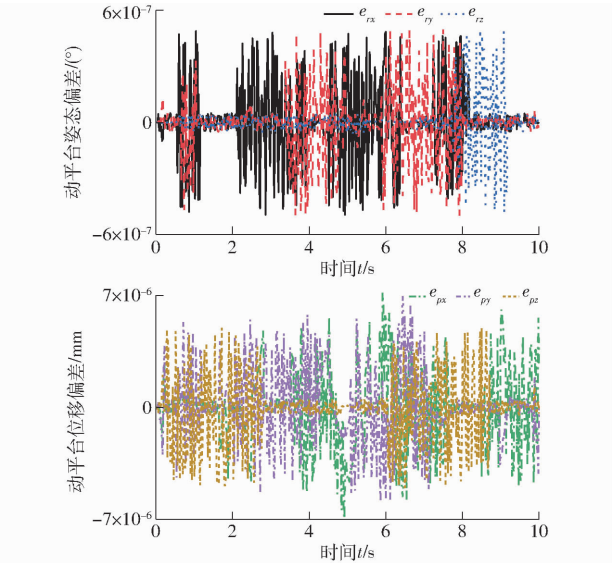


图 21 理论值与仿真值位姿偏差
Fig. 21 Deviation of posture between theory and simulation

图 21 中, e_{rx} 、 e_{ry} 、 e_{rz} 分别表示欧拉角 3 个方向的偏差, e_{px} 、 e_{py} 、 e_{pz} 表示 3 个方向位移的偏差。由图 21 可知,偏差最大取值范围仍在 10^{-6} 量级,可以认定理论结果与仿真结果完全一致。证明机构正解的流程与方法同样正确。

6 结论

(1)提出一种通过六杆机构与机构原驱动杆件组合的新型双输入子闭环结构。使机构既能实现双模式运动融合,又可以保持原 6-RUS 机构的原动件不变。

(2)建立机构运动学反解模型和内、外层机构数值方法的正解流程,将分析过程分为子闭环内与外主体机构两部分,子闭环的输出运动即为外主体机构的输入,其中外主体即为 6-RUS 机构,可以直接运用原有结论进行分析,将双输入融合的难点问题集中在双输入子闭环内。

(3)通过算例分别对单轴运动双模融合、多轴复合运动双模融合的反解,以及双输入融合驱动下的正向运动学进行理论计算与仿真验证,结果表明,理论分析结果与仿真结果完全一致,证明了针对所提构型所建立的运动学分析模型以及计算流程的正确性。

参 考 文 献

[1] 戴建生,丁希仑,邹慧君. 变胞原理和变胞机构类型[J]. 机械工程学报,2005,41(6):7-12.
DAI Jiansheng,DING Xilun,ZOU Huijun. Fundamentals and categorization of metamorphic mechanisms[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2005,41(6):7-12. (in Chinese)

[2] 康熙,戴建生. 机构学中机构重构的理论难点与研究进展——变胞机构演变内涵、分岔机理、设计综合及其应用[J]. 中国机械工程,2020,31(1):57-71.
KANG Xi,DAI Jiansheng. Theoretical difficulties and research progresses of mechanism reconfiguration in mechanisms—evolution connotation, furcation principle, design synthesis and application of metamorphic mechanisms[J]. China Mechanical Engineering,2020,31(1):57-71. (in Chinese)

[3] 于靖军,刘凯,孔宪文. 多模式机构研究进展[J]. 机械工程学报,2020,56(19):14-27.
YU Jingjun,LIU Kai,KONG Xianwen. State of the art of multi-mode mechanisms[J]. Journal of Mechanical Engineering,2020,56(19):14-27. (in Chinese)

[4] 单彦霞,张建伟,于靖军,等. 多模式并联机构操作模式变换方法研究[J]. 农业机械学报,2020,51(6):396-403.
SHAN Yanxia,ZHANG Jianwei,YU Jingjun,et al. Operation mode transformation method of multi-mode parallel mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(6):396-403. (in Chinese)

[5] 刘伟,刘宏昭. 具有 3T、2T1R 和 2R1T 模式的并联机构构型综合[J]. 农业机械学报,2019,50(12):411-419.
LIU Wei,LIU Hongzhao. Synthesis of parallel mechanism with 3T, 2T1R and 2R1T motion modes[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(12):411-419. (in Chinese)

[6] 沈惠平,赵迎春,许可,等. 一种可重构、部分运动解耦的空间 n 维平移 1 维转动并联机构的拓扑及其运动学设计[J]. 中国机械工程,2019,30(4):413-422.
SHEN Huiping,ZHAO Yingchun,XU Ke,et al. Topology and kinematics design of spatially n T1R-type reconfigurable and partial motion decoupling parallel mechanism[J]. China Mechanical Engineering,2019,30(4):413-422. (in Chinese)

[7] 邹琦,曲海波,郭盛. 一种三自由度可重构并联机构优化设计及性能分析[J]. 中国机械工程,2018,29(10):1172-1178.
ZOU Qi,QU Haibo,GUO Sheng. Optimal design and performance analysis of a 3-dof reconfigurable parallel mechanism[J]. China Mechanical Engineering,2018,29(10):1172-1178. (in Chinese)

[8] 石志新,叶梅燕,罗玉峰,等. 四自由度两模式并联机构结构综合与位置分析[J]. 农业机械学报,2017,48(4):383-389.
SHI Zhixin,YE Meiyang,LUO Yufeng,et al. Type synthesis and position analysis of 4-dof parallel mechanisms with two operation modes[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(4):383-389. (in Chinese)

[9] QU Haibo,HU Lanqing, GUO Sheng. Singularity analysis and avoidance of a planar parallel mechanism with kinematic redundancy under a fixed orientation[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science,2021,235(18):3534-3553.

[10] QU Haibo, GUO Sheng. Kinematics analysis of a novel planar parallel manipulator with kinematic redundancy[J]. Journal of Mechanical Science and Technology,2017,31(4):1927-1935.

[11] ZHAO Fuqun, GUO Sheng, ZHANG Chengyu, et al. Singularity analysis and dexterity performance on a novel parallel mechanism with kinematic redundancy[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2019, 16(5): 172988141987264.

[12] GOSSELIN C, LALIBERTE T, VEILLETTE A. Singularity-free kinematically redundant planar parallel mechanisms with unlimited rotational capability[J]. IEEE Transactions on Robotics,2015,31(2):457-467.

[13] GOSSELIN C, SCHREIBER L T. Kinematically redundant spatial parallel mechanisms for singularity avoidance and large orientational workspace[J]. IEEE Transactions on Robotics,2016,32(2):1-15.

[14] SCHREIBER L T, GOSSELIN C. Kinematically redundant planar parallel mechanisms: kinematics, workspace and trajectory planning[J]. Mechanism and Machine Theory,2018,119:91-105.

[15] LI Luquan,FANG Yuefa, GUO Sheng, et al. Type synthesis of a class of novel 3-DOF single-loop parallel leg mechanisms for walking robots[J]. Mechanism and Machine Theory,2020,145:103695.

[16] LI Luquan,FANG Yuefa,WANG Lin. Design of a family of multi-DOF drive systems for fewer limb parallel mechanisms[J]. Mechanism and Machine Theory,2020,148:103802.

[17] 朱小蓉,李世杰,周宇东,等. 含双驱动五杆回路的弱耦合并联机构型综合[J]. 农业机械学报,2021,52(10):434-442.
ZHU Xiaorong,LI Shijie,ZHOU Yudong,et al. Structural synthesis of parallel mechanisms containing dual drive five-bar loop [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(10):434-442. (in Chinese)

[18] 陈宇航,赵铁石,边辉,等. 含子闭环的并联机构运动学分析[J]. 农业机械学报,2015,46(12):346-354.
CHEN Yuhang,ZHAO Tieshi,BIAN Hui,et al. Kinematics analysis of parallel mechanism with sub closed-chains [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(12):346-354. (in Chinese)

[19] ZHAO Xingyu,ZHAO Tieshi,WANG Chang,et al. Type synthesis and analysis of parallel mechanisms with sub-closed-loops [J]. Mechanism and Machine Theory,2018,120:140-165.

[20] 黄真,赵永生,赵铁石. 高等空间机构学[M]. 2版. 北京:高等教育出版社,2014.

[21] 耿明超,赵铁石,王唱,等. 基于拟 Newton 法的并联机构位置正解[J]. 机械工程学报,2015,51(9):28-36.
GENG Mingchao,ZHAO Tieshi,WANG Chang,et al. Direct position analysis of parallel mechanism based on quasi-Newton method[J]. Journal of Mechanical Engineering,2015,51(9):28-36. (in Chinese)

(上接第 421 页)

[10] 杨士敏. 履带车辆接地比压分布规律对附着力的影响[J]. 中国公路学报,1995,8(2):85-88.
YANG Shimin. The effects of tracked vehicles' contact pressure distribution on adhesive force[J]. China Journal of Highway and Transport, 1995, 8(2):85-88. (in Chinese)

[11] 陈秉聪,范雅操,宁素俭. 履带车辆行驶阻力的研究[J]. 吉林工业大学学报,1983,27(3):12-27.
CHEN Bingcong,FAN Yacao,NING Sujian. Study of the driving resistance of tracked vehicles[J]. Journal of Jilin University of Technology, 1983, 27(3):12-27. (in Chinese)

[12] 刘志彬. 履带式移动机器人建模与动态仿真研究[D]. 呼和浩特:内蒙古工业大学,2009.
LIU Zhibin. Modeling and research on dynamic simulation for tracked mobile robot[D]. Huhhot: Inner Mongolia University of Technology, 2009. (in Chinese)

[13] 黄亮. 一种适应于丘陵果园的运输车研制与试验研究[D]. 南京:南京农业大学,2017.
HUANG Liang. Development and experimental study on a transporter adapting to hill orchard [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2017. (in Chinese)

[14] 潘冠廷,杨福增,孙景彬,等. 小型山地履带拖拉机爬坡越障性能分析与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(9):374-383.
PAN Guanting,YANG Fuzeng,SUN Jingbin,et al. Analysis and test of obstacle negotiation performance of small hillside crawler tractor during climbing process[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(9): 374-383. (in Chinese)

[15] 饶伟,施家栋,王建中. 关节式履带机器人爬楼梯动态稳定性分析[J]. 机械工程学报,2014,50(15):60-67.
RAO Wei,SHI Jiadong,WANG Jianzhong. Analysis of dynamic stability for articulated-tracked robot climbing stairs [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(15):60-67. (in Chinese)

[16] 张响亮,张华,熊根,等. 基于 RecurDyn 的履带式消防机器人设计与爬梯运动学仿真[J]. 机械传动,2020,44(6):89-95.
ZHANG Xiangliang,ZHANG Hua,XIONG Gen,et al. Design and simulation of tracked fire fighting robot based on RecurDyn [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2020, 44(6):89-95. (in Chinese)

[17] 陈继清,黄仁智,莫荣现,等. 基于 RecurDyn 小型绿篱修剪机履带底盘越障性能分析与仿真[J]. 中国农机化学报,2020,41(10):89-98.
CHEN Jiqing,HUANG Renzhi,MO Rongxian,et al. Analysis and simulation of obstacle crossing performance of tracked chassis of small hedge trimmer based on RecurDyn[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(10):89-98. (in Chinese)

[18] 骆清国,司东亚,龚正波,等. 基于 RecurDyn 的履带车辆动力学仿真[J]. 车辆与动力技术,2011,33(4):26-28,50.
LUO Qingguo,SI Dongya,GONG Zhengbo,et al. Dynamic simulation of a tracked vehicle based on RecurDyn[J]. Vehicle & Power Technology, 2011, 33(4):26-28,50. (in Chinese)