

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.04.043

具有位置正解解析式的三平移并联机器人机构运动学分析与优化

赵海彬¹, 曹凯², 刘进福³, 徐冬¹

(1. 江苏安全技术职业学院 智能制造与应急装备学院, 江苏 徐州 221162;

2. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016;

3. 常州工业职业技术学院 智能控制学院, 江苏 常州 213164)

摘 要:针对三平移并联机器人机构正解计算过程复杂且无符号解所引起的实时控制问题,依据方位特征集的并联机构拓扑设计理论和方法,设计一种零耦合度且有解析式位置正解的三平移并联机构。计算该机构的耦合度和自由度、方位特征集等特性,得到位置正解和位置逆解;分析机构的奇位异型,给定一组参数并研究其工作空间和灵巧度分布。通过 NSGA-II 算法对全局灵巧度和工作空间体积进行多目标优化。研究结果表明:该机构具有解析式位置正解,工作空间对称无空洞,灵巧度分布均匀,得出了两个目标优化下的 Pareto 优化解。

关键词:并联机器人;三平移;耦合度;工作空间;灵巧度

中图分类号:TP242 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2025)04-0236-07

Kinematic Analysis and Optimization of Three Translational Parallel Robot Mechanism with Position Forward Solution Analytical Formula

ZHAO Haibin¹, CAO Kai², LIU Jinfu³, XU Dong¹

(1. School of Intelligent Manufacturing and Emergency Equipment, Jiangsu College of Safety Technology, Xuzhou 221162, China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

3. School of Intelligent Control, Changzhou Institute of Industry Technology, Changzhou 213164, China)

Abstract:Based on topology design theory and method of parallel mechanism of the characteristics of orientation feature set, three translation parallel mechanism with zero coupling degree and analytical position forward solution was proposed to solve the problem of real-time control caused by the complex and unsigned forward solution calculation process. The coupling degree and degree of freedom of the mechanism as well as the characteristics of the orientation feature set were calculated, and the position forward solution and position inverse solution were obtained. The singularity of the mechanism was analyzed, a set of parameters was given, and the workspace and dexterity distribution of the mechanism were studied. Multi objective optimization of global dexterity and workspace volume was carried out using the NSGA-II algorithm. The results show that the mechanism has an analytical position positive solution, a symmetric workspace without voids, and a uniform dexterity distribution, which provide the Pareto optimization solutions optimized by the two objectives.

Keywords:parallel manipulator; three translation; coupling degree; workspace; dexterity

0 引言

三自由度的三平移并联机构因能够满足工业机器人在空间中完成各种取放操作的要求而备受关注^[1],其广泛地应用于物料分拣、机械制造等领域^[2]。

使用较多的并联 Delta 机构由 VISCHER 等^[3]于 1985 年提出,之后众多学者研究了 Delta 机构以及其衍生机构的运动学、动力学问题^[4]。Delta 衍生机构的大部分机构耦合度大于 1,沈惠平

等^[5]提出新型三平移(3T)并联机构,其符号解为正向位置。机构学专家杨廷力教授^[6]基于拓扑结构学、方位特征集理论设计了多种新型 3T 机构。所设计机构的动力学分析较为复杂。叶梅燕等^[7]设计空间曲线三平移机构的构型综合及分类方法;MACHO 等^[8]设计一种新型无冗余约束的三平移并联机器人。YANG 等^[9]提到了多种具有可变杆长的平行四边形子链,并指出这种子链可以增加工作空间或提高机构的精度。YANG 等^[10]针对拾放操作重载的要求,提出一种新型 3-DoF

基金项目:江苏省自然科学基金项目(BK20220241)

第一作者简介:赵海彬(1984—),男,山东济宁人,工程师,硕士,研究方向为机器人机构学、智能生产线、CAD/CAM, zhbytu1576@163.com。

非对称平移并联机构。

以上设计的大部分并联机器人机构位置正解无符号解且运动输入输出无解耦性。其正运动学分析复杂不利于并联机构的运动控制、轨迹规划。针对并联机构运动学正解复杂所引起的实时控制问题,提出一种新型并联机构,该机构耦合度为零,可得其位置正解的解析解,并建立运动学模型,分析运动学、工作空间、灵巧度、奇异性等性能。

1 并联机构的设计

1.1 机构分析

如图 1、图 2 所示,本文设计一种低耦合度的三平移并联机构,其中支链 1 为混合支链,由两个 SOC{ $\perp$ Pa//P} 并联后与 Pa 串联而成,支链 2 的单开链可表示为 SOC{-C//Pa//R}, C 表示圆柱副,Pa 表示平行四边形机构。

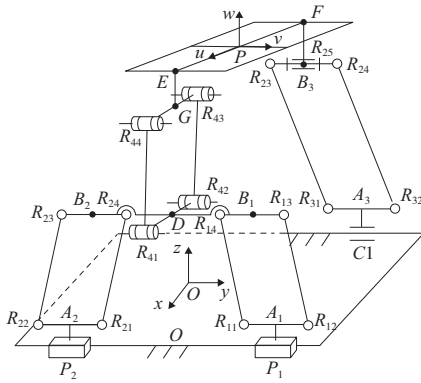


图 1 并联机构结构简图

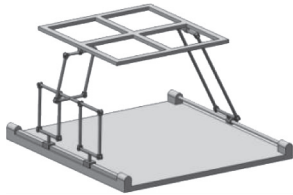


图 2 并联机构三维模型

1.2 拓扑特性分析

1) 结合机构简图,并依据三平移并联两条复杂支链的拓扑结构,分析出各个支链项对应的 POC 集 M_{lj} 。

a) 混合支链 1 的方位特征集:

$$M_{b1} = \begin{bmatrix} t^2 \\ r^0 \end{bmatrix} \cup \begin{bmatrix} t^1 \\ r^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t^3 \\ r^0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

b) 支链 2 的单开链为 SOC{-C//Pa//R}, 计

算得到支链的 M_{b2} 为

$$M_{b2} = \begin{bmatrix} t^1 \\ r^1(//R_{32}) \end{bmatrix} \cup \begin{bmatrix} t^1 \\ r_0 \end{bmatrix} \cup \begin{bmatrix} t^1 \\ r^1(//R_{32}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t^3 \\ r^3(//R_{32}) \end{bmatrix} \quad (2)$$

2) 确定两支链的位移方程:

$$\begin{cases} \xi_{L,1} = \begin{bmatrix} t^3 \\ r^0 \end{bmatrix} = 3 \\ \xi_{L,2} = \begin{bmatrix} t^3 \\ r^0 \end{bmatrix} \cup \begin{bmatrix} t^3 \\ r^1 \end{bmatrix} = 4 \end{cases} \quad (3)$$

计算并联机构动平台的 POC 集为

$$M_{Pa(1-2)} = M_{b1} \cap M_{b2} = \begin{bmatrix} t^3 \\ r^0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

3) 并联机构的自由度计算 F

$$F = \sum_{i=1}^m f_i - \sum_{j=1}^v \xi_{L,j} = 10 - 3 - 4 = 3 \quad (5)$$

4) 约束度 Δ_j 分析,利用上面的分析结果计算耦合度,其分析过程如下:

$$\begin{cases} \Delta_1 = \sum_{i=1}^{m_j} f_j - I_j - \xi_{L,j} = 5 - 2 - 3 = 0 \\ \Delta_2 = \sum_{i=1}^{m_j} f_j - I_j - \xi_{L,j} = 5 - 1 - 4 = 0 \\ k = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^v |\Delta_j| = 0 \end{cases} \quad (6)$$

耦合度的大小决定了机构运动学求解的复杂程度,耦合度为 0,可得到位置正向的解析解。

2 机构的位置分析

将静坐标系 $\{O-xyz\}$ 建立在静平台中心,将动坐标系 $\{P-uvw\}$ 建立在动平台中心。进一步,定义动、静平台边长分别为 $2r, 2R$ 。为了计算方便,杆长 $P_i A_i (i=1, 2)$ 为 l_1 , 平行四边形长边杆长 $A_i B_i = l_2 (i=1, 2)$, 支链 2 的平行四边形杆长 $A_3 B_3 = l_4$, $B_1 D = B_2 D = l_3$ 。

2.1 位置正分析

并联机构位置正解是指依据机构输入的值计算出动平台的位姿^[11]。分别对支链 1、2 进行求解,已知执行末端 P 点坐标 (x, y, z) , 已经驱动副输入 $d = (d_1, d_2, d_3)$ 。可知 A_i, P_i 点的坐标矢量:

$$\begin{cases} P_1 = [R, d_1, 0]^T \\ P_2 = [R, d_2, 0]^T \\ C_1 = [-R, d_3, 0]^T \\ A_1 = [R, d_1, l_1]^T \\ A_2 = [R, d_2, l_1]^T \\ A_3 = [-R, d_3, 0]^T \end{cases} \quad (7)$$

1) 支链 1 位置正解, 设置 D 点坐标 $D(R, y, z_D)$, 由于 $B_1B_2 \parallel A_1A_2$ 则 $z_D = z_{B,1} = z_{B,2}$, 因此, 可以得到 B_i 点坐标矢量:

$$\begin{cases} B_1 = (R, y+l_3, z_D) \\ B_2 = (R, y-l_3, z_D) \end{cases} \quad (8)$$

由于平行四边形几何杆长约束如下:

$$|A_iB_i| - l_2 = 0 \quad (i=1, 2) \quad (9)$$

$$\begin{cases} (y+l_3-d_1)^2 + (z_D-l_1)^2 = l_2^2 \\ (y-l_3-d_1)^2 + (z_D-l_1)^2 = l_2^2 \end{cases} \quad (10)$$

根据上述等式, 推导得到:

$$\begin{cases} y = \frac{d_2+d_1}{2} \\ z_D = l_1 \pm \sqrt{l_2^2 - (y+l_3-d_1)^2} \end{cases} \quad (11)$$

2) 分析支链 2 位置正解, 已知动平台几何中心的坐标, 可推导得到已知 $C_1(-R, d_3, 0)$, 推导出 G, B_3 点的位置坐标矢量:

$$\begin{cases} G = [x+r, y, z]^T \\ B_3 = [x-r, y, z]^T \end{cases} \quad (12)$$

由于支链长度为 l_4 , DE 的长度 l_2 , 根据杆长不变性特点, 得到约束方程如下:

$$\begin{cases} |A_3B_3| - l_4 = 0 \\ |DG| - l_2 = 0 \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} (x-r+R)^2 + (y-d_3)^2 + z^2 = l_2^2 \\ (x+r-R)^2 + (z-z_D)^2 = l_2^2 \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} x = \frac{-u_4 \pm \sqrt{u_3^2 - u_5 u_3}}{2u_3} \\ z = u_1 x + u_2 \end{cases} \quad (15)$$

式中: $u_1 = \frac{2R}{z_D}$; $u_2 = \frac{z_D^2 - (y-d_3)^2 - l_2^2 - l_4^2}{2z_D}$; $u_3 = 1 + u_1^2$;

$u_4 = 2(R + u_1(u_2 - z_D))$; $u_5 = R^2 - (u_2 - z_D)^2 - l_2^2$ 。

2.2 位置逆分析

位置逆解分析是依据动平台的姿态值计算得出机构输入值的过程^[12], 即已知 $P(x, y, z)$, 可以得到 B_1, B_2, D 点坐标矢量:

$$\begin{cases} B_1 = [R, y+l_3, z-l_5-l_2\sin\theta]^T \\ B_2 = [R, y-l_3, z-l_5-l_2\sin\theta]^T \\ D = [x+r-l_2\cos\theta, y, z-l_5\sin\theta]^T \end{cases} \quad (16)$$

由于 D 在 x 轴的长度恒定为 R , 因此, 推导得到 θ 表达式:

$$\theta = \arccos\left(\frac{x+R-r}{l_2}\right) \quad (17)$$

由于几何约束 $B_1A_1 = B_2A_2 = l_2, B_3C_3 = l_4$, 得

到约束方程如下:

$$\begin{cases} (y+l_3-d_1)^2 + (z-l_2\sin\theta-l_1)^2 = l_2^2 \\ (y-l_3-d_1)^2 + (z-l_2\sin\theta-l_1)^2 = l_2^2 \\ (x-r+R)^2 + (y-d_3)^2 + z^2 = l_4^2 \end{cases} \quad (18)$$

因此, 得到位置逆解方程为

$$\begin{cases} d_1 = y+l_3 \mp \sqrt{l_2^2 - (z-l_2\sin\theta-l_1)^2} \\ d_2 = y-l_3 \mp \sqrt{l_2^2 - (z-l_2\sin\theta-l_1)^2} \\ d_3 = y \mp \sqrt{l_4^2 - z^2 - (x-r+R)^2} \end{cases} \quad (19)$$

3 奇异位形分析

3.1 分析方法

当机构处于奇异位置时运动失稳, 不能正常工作^[13], 采用 Jacobian 法对该三平移并联机构分析奇异位形, 设机构驱动副输入 $d = [d_1, d_2, d_3]^T$, 驱动副速度 $\dot{d} = [\dot{d}_1, \dot{d}_2, \dot{d}_3]^T$, 动平台位移 $X = [x, y, z]^T$, 动平台速度 $\dot{X} = [v_x, v_y, v_z]^T$, 则有:

$$\begin{cases} J_X \dot{X} = J_d \dot{d} \\ J_d = \begin{bmatrix} n_1 & 0 & 0 \\ 0 & n_2 & 0 \\ 0 & 0 & n_3 \end{bmatrix} \\ J_X = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (20)$$

式中: $n_1 = y + l_3 - d_1$; $n_2 = y - l_3 - d_2$; $n_3 = y - d_3$; $m_{11} = \cot\theta(z - l_2\sin\theta - l_1)$; $m_{12} = y + l_3 - d_1$; $m_{13} = (z - l_5 - l_2\sin\theta - l_1)$; $m_{21} = \cot\theta(z - l_2\sin\theta)$; $m_{22} = y + l_3 - d_2$; $m_{23} = (z - l_2\sin\theta)$; $m_{31} = x - r + R$; $m_{32} = y - d_3$; $m_{33} = z$ 。

3.2 逆解异性分析

当 $\det(J_d) = 0$ 且要求 $\det(J_X) \neq 0$ 。机构位于逆解奇异时, 动平台自由度减少。可得 J_d 的方程解集 M :

$$M = \{M_1 \cup M_2 \cup M_3\} \quad (21)$$

式中: M_1 为 $n_1 = y + l_3 - d_1$ 为 0 的解集, 对应构型如图 3(a) 所示; M_2 为 $n_2 = y - l_3 - d_2$ 为 0 的解集, 对应构型如图 3(b) 所示; M_3 为 $n_3 = y - d_3$ 为 0 的解集。对应构型如图 3(c) 所示。

3.3 正解异性分析

机构正解奇异发生的条件为 $\det(J_X) = 0$ 且要求 $\det(J_d) \neq 0$ 。机构发生正解奇异时, 机构的自由度增多^[14], 定义 $[M_{i1}, M_{i2}, M_{i3}]^T = T_i, J_X$ 可以表示为

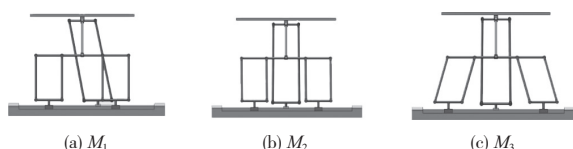


图3 逆解奇异情形

$$\mathbf{J}_X = [\mathbf{T}_1, \mathbf{T}_2, \mathbf{T}_3]^T \quad (22)$$

满足 $\det(\mathbf{J}_X) = 0$ 可能存在两种情况:1)若 $T_1 = mT_2$,那么 $\mathbf{B}_1\mathbf{A}_1$ 与 $\mathbf{B}_2\mathbf{A}_2$ 平行,此时对应的构型如图4所示;2)若 $T_1 = m_1T_2 + m_2T_2$,经计算,此方程无法解出 m_1, m_2 ,故此情况不存在。

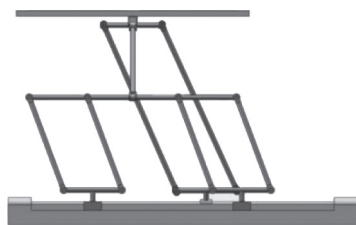


图4 正解奇异情形

3.4 混合奇异性分析

混合奇异存在条件为逆解奇异和正解奇异同时存在。即 $\det(\mathbf{J}_d) = \det(\mathbf{J}_X) = 0$ 。因此存在以下两种情况。1) $\mathbf{B}_1\mathbf{A}_1$ 与 $\mathbf{B}_2\mathbf{A}_2$ 平行,构型如图3(a)所示。2) $\mathbf{B}_1\mathbf{A}_1$ 与 $\mathbf{B}_2\mathbf{A}_2$ 平行且支链3垂直静平台。构型如图5所示。

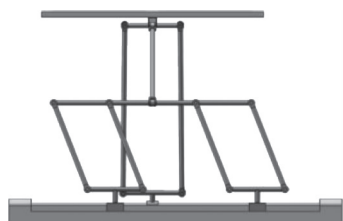


图5 混合奇异情形

4 机构的工作空间和运动能力分析

4.1 工作空间分析

机构的运动范围主要受主动副运动范围的影响^[15-17]。采用蒙特卡罗法数值法求解工作空间,并运用表1中给出的参数表进行算例分析。

表1 参数表					
单位:m					
R	r	l_1	l_2	l_3	l_4
0.3	0.2	0.05	0.4	0.2	0.4

由图6可知,在该结构参数下,工作空间呈现两个驼峰的形状,中间约0.4m宽的一条缝隙,整

个工作空间内部无空洞,形状对称分布,机构可在这区域进行运行,该参数下可达工作空间体积为 $0.179\ 71\ \text{m}^3$ 。

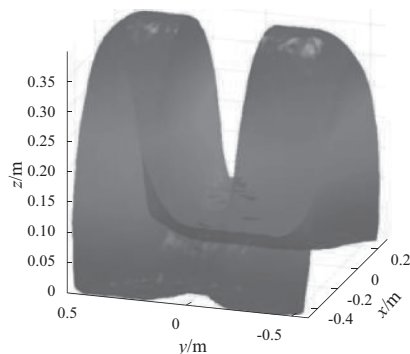


图6 工作空间三维图

4.2 机构运动性能

通过表1参数,设计一个圆形的运动轨迹曲线,仿真机构的运动性能,建立以下曲线方程:

$$\begin{cases} X = 0.1 \sin(5t) - 0.1 \\ Y = 0.25 \\ Z = 0.1 \cos(5t) + 0.2 \end{cases} \quad (23)$$

运动轨迹和驱动副变化如图7所示。

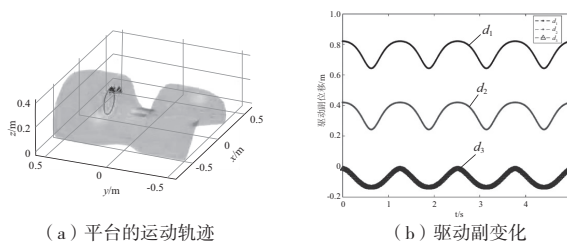


图7 运动轨迹和驱动副变化

从图7看,在圆形运动轨迹下,驱动副 d_1, d_2 是完全类似的波形, d_3 是独立的运动曲线,振幅更小,3个曲线运行平稳无突变,表明了其运动性能连续稳定。

5 并联机构运动灵巧性分析

机构灵巧度是衡量机构运动时传递精度性能重要指标。灵巧度具体定义为条件数的倒数,公式如下:

$$G_{CI} = \frac{\int_w L_{CI} dw}{\int_w dw} \quad (24)$$

式中: $L_{CI} = \frac{1}{\|\mathbf{J}\| \cdot \|\mathbf{J}^{-1}\|}$; w 表示工作空间。

利用上述定义公式分析机构在工作空间内的

灵巧度情况,通过 Matlab 软件,得到如图 8 所示的运动灵巧度分布。

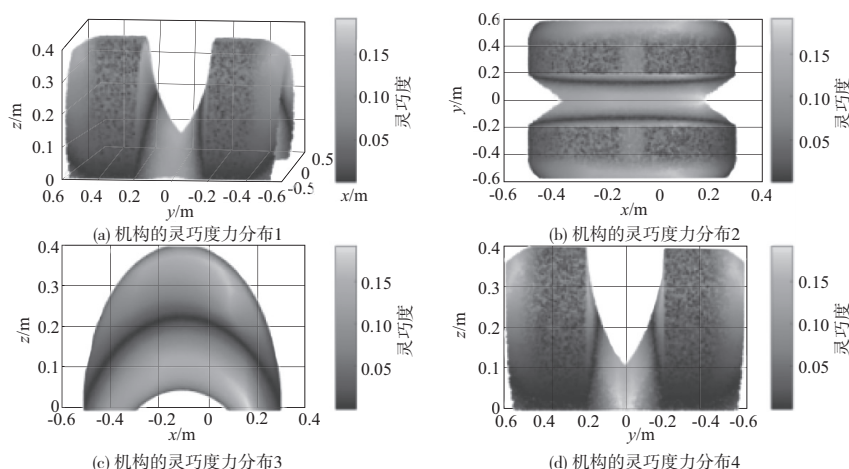


图 8 运动灵巧度分布图

图 8 所示为该机构的灵巧度空间分布,最高值分布于机构的 y 轴三处对称点,从 xOy , xOz 和 yOz 视角看,该机构具有较好的对称性,较差的灵巧度分布于 xOz 视角,为半圆形,将机构的灵巧度分为两个部分。从以上研究可知,需要对机构参数优化,增加工作空间体积,以获得均衡的机构性能。

6 优化仿真

6.1 优化模型建立

考虑到第 5 节中工作空间以及灵巧度算例分析结果不理想情况,根据实际应用需求,为了得到较好的工作空间性能以及灵巧度性能,因此,以工作空间体积大小以及灵巧度来得到最佳参数解。建立的目标函数如下:

$$\max \begin{cases} V = \frac{4nxyz}{N} \\ G_{CI} = \frac{\int_w \frac{1}{\|J\| \cdot \|J^{-1}\|} dw}{\int_w dw} \end{cases} \quad (25)$$

式中: N 为搜索范围内点的数量; n 为满足约束条件的点的数量; G_{CI} 为全局灵巧度。

$$\text{Subject to} \begin{cases} 0.1 \leq R \leq 0.5 \\ 0.05 \leq r \leq 0.5 \\ 0.05 \leq l_1 \leq 0.5 \\ 0.1 \leq l_2 \leq 0.5 \\ 0.1 \leq l_3 \leq 0.5 \\ 0.1 \leq l_4 \leq 0.5 \end{cases} \quad (26)$$

6.2 优化算法的选择

针对上述含有约束变量的多目标问题,采用标准的 NSGA-II 多目标优化。NSGA-II 是采用拥挤度进行 Pareto 集的优化算法,算法变异指数为 20,较差指数为 20,种群为 200 个,迭代 200 次,锦标赛选手数为 2 个。通过迭代得到 Pareto 优化前沿集,如图 9 所示。显然可达工作空间体积和全局灵巧度是分离的, Pareto 前沿可看成两个部分,在全局灵巧度大于 0.12 前,工作空间体积很小,随着体积增加,全局灵巧度从约 0.172 陡然降低到 0.12,此时体积约为 0.02 m^3 ; 在全局灵巧度小于 0.12 后,灵巧度随着体积的增加变化为平缓抛物线,体积变为 0.5 m^3 后,全局灵巧度约为 0.08。通过该前沿曲线,可以选择平衡的体积和灵巧度,作为实际机构的参考参数。

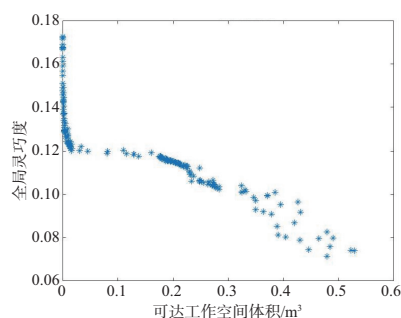


图 9 Pareto 优化集

6.3 优化算例分析

根据优化后的几组参数得到该并联机构的工作空间、灵巧度分布如图 10 和表 2 所示。

表 2 优化后参数表

组别	R/m	r/m	l_1/m	l_2/m	l_3/m	l_4/m	V/m^3	G_{CL}
1	0.340 5	0.266 2	0.053 6	0.500	0.283 4	0.489 6	0.489 8	0.079 8
2	0.280 0	0.065 4	0.050 0	0.500	0.289 1	0.500 0	0.522 6	0.074 3
3	0.137 4	0.164 3	0.061 5	0.153	0.486 8	0.429 0	0.110 0	0.120 4
4	0.311 1	0.377 3	0.050 0	0.331	0.268 7	0.500 0	0.324 3	0.104 0

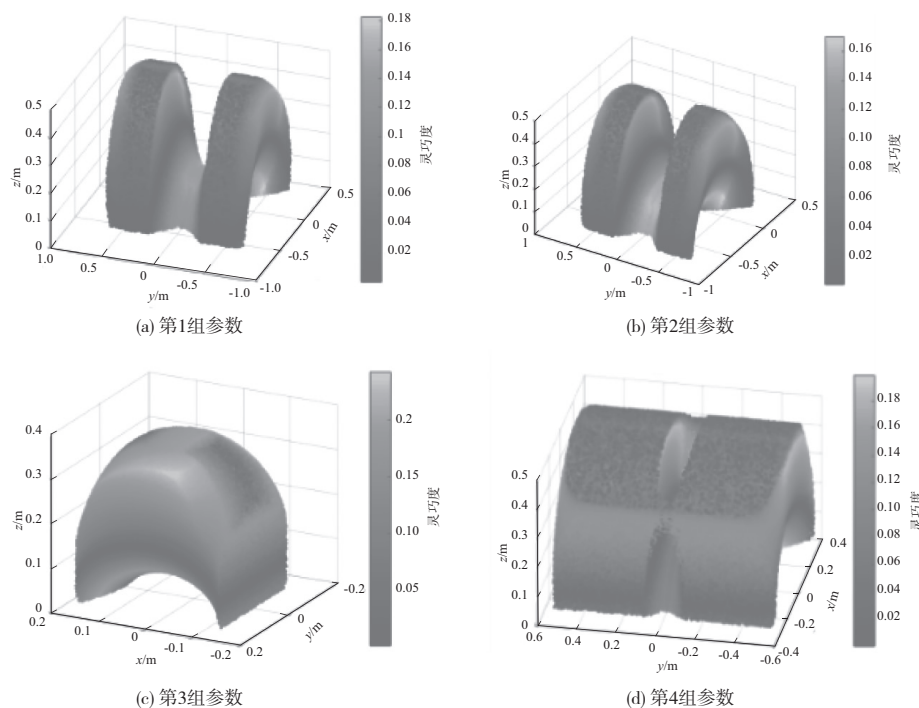


图 10 4 组 Pareto 优化的工作空间和灵巧度图

图 10 和表 2 展示了不同阶段的 Pareto 优化解,具有较小体积和较大全局灵巧度的第 3 组,此组全局灵巧度为 0.120 4,该组工作空间为一个整体半轮胎图像,没有缝隙,从第 4 组开始,全局灵巧度为 0.104 0,从 $x=0$ 开始出现了分裂,直到全局灵巧度为 0.079 8 和 0.074 3(第 1 组和第 2 组)分为明显的左右两个部分的工作空间,这表明灵巧度和工作空间体积发生了具体的精细空间分布演化。从机构参数来看 l_1 都处于参数的下限附近,体积较大的 l_3 都在 0.28 左右,而体积较小的第 3 组, l_3 为 0.486 8;体积较大时 l_2 较大。根据以上分析可以对实际机构进行参数选择。

7 结语

1) 设计一种具有位置正解解析式的三平移并联机器人机构,该机构耦合度为零,位置正解分析简单,有利于机构的运动控制。

2) 通过工作空间分析表明:工作空间呈现两

个驼峰的形状,中间区域存在一条缝隙,整个工作空间内部无空洞,形状对称分布。

3) 根据标准的 NSGA-II 多目标优化算法优化得到 Pareto 优化前沿集,可根据实际应用需求选择不同优化目标的尺寸参数。

参考文献:

- [1] LIN S T, HUANG S Y, LAN C C, et al. Design and experiment of a new translational parallel manipulator with large payload and high repeatability[J]. Mechanism and Machine Theory, 2023, 180: 105124.
- [2] HUANG Y D, LU Q G, WANG H Z, et al. Kinematics analysis and simulation of a novel 3T parallel mechanism [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2022(1): 3424012.
- [3] VISCHER P, CLAVEL R. Kinematic calibration of the parallel Delta robot [J]. Robotica, 1998, 16 (2): 207-218.
- [4] TSAI L W, JOSHI S. Kinematics and optimization of a spatial 3-UPU parallel manipulator [J]. Journal of Mechanical Design, 2000, 122(4): 439-446.
- [5] 沈惠平, 吉昊, 许正晓, 等. 三平移机构设计与运动学

- 符号解及性能评价[J]. 农业机械学报,2020,51(9): 397-407.
- [6] 杨廷力. 机器人机构拓扑结构学[M]. 北京:机械工业出版社,2004.
- [7] 叶梅燕,石志新,罗玉峰. 空间曲线平移并联机构构型综合与分类[J]. 农业机械学报,2019,50(6): 397-404.
- [8] MACHO E, URÍZAR M, PETUYA V, et al. Designing a translational parallel manipulator based on the 3SS Kinematic Joint [J]. Journal of Mechanisms and Robotics,2019,11(5):051007.
- [9] YANG Y, ZHANG W X, PU H Y, et al. A class of symmetrical 3T, 3T-1R, and 3R mechanisms with parallel linear motion elements [J]. Journal of Mechanisms and Robotics,2018,10(5):051016.
- [10] YANG Y, TANG Y Q, CHEN H J, et al. Mechanism design and parameter optimization of a new asymmetric translational parallel manipulator [J]. Mechanical Sciences,2019,10(1):255-272.
- [11] 沈惠平,赵海彬,邓嘉鸣,等. 基于自由度分配和方位特征集的混联机器人机型设计方法及应用[J]. 机械工程学报,2011,47(23):56-64.
- [12] 龚峻山,方跃法,靳晓东. 基于并联手指结构的多功能灵巧手的设计与研究[J]. 中国机械工程,2020,31(23):2837-2846.
- [13] 张伟中,冯邵江,袁鑫宏,等. 2-PRU-PRRPa 并联机构运动学分析与性能优化[J]. 农业机械学报,2025,56(1):497-506.
- [14] 鞠涛,沈惠平,李涛. 一种用于汽车零部件分拣与传送并联机构的设计及动力学分析[J]. 机械传动,2024,48(2):61-69.
- [15] 张莉,朱磊,徐冬. 低耦合 PRPaR/2CRR 并联机构运动学分析与性能优化[J]. 机械传动,2024,48(10):83-95.
- [16] 吴昊,姜运祥,汤赫男,等. 2-RRR 并联机构的运动学及工作空间分析[J]. 组合机床与自动化加工技术,2024(1):58-62.
- [17] 马慧欣,许添旗,叶凡,等. 2PRU-PRUPc 并联机构的动力学分析[J]. 机械设计与研究,2024,40(4):7-11.

收稿日期:2023-12-19

(上接第 173 页)

±5%范围内,达到了稳定的加工控制效果;优化处理后表面粗糙度介于 2.36~4.63 μm 之间,能够获得理想的加工表面质量。

参考文献:

- [1] 张华,马超,鄢威,等. 数模联动的多特征工件加工能耗预测方法研究[J]. 组合机床与自动化加工技术,2024(4):66-71.
- [2] 韩军,沈伟东,董冰洋,等. 改进粒子群算法的环形薄壁零件铣削参数优化[J]. 制造技术与机床,2023(6):133-138.
- [3] 程耀楠,马春杰,张剑宇,等. 高速干式滚齿加工工艺参数优化研究进展[J]. 哈尔滨理工大学学报,2022,27(2):10-20.
- [4] 田颖,邵文婷,王太勇. 车间生产过程的能量足迹建模与加工参数协同优化[J]. 中国机械工程,2022,33(21):2547-2553.
- [5] 张臣,周来水,安鲁陵,等. 基于铣削力仿真的离线进给速度优化技术[J]. 南京航空航天大学学报,2009,41(3):358-363.
- [6] 徐世昌,杨文安,鄢雪峰. 五轴机床后处理非线性误差精确插补算法[J]. 机械制造与自动化,2024,53(6):47-52.
- [7] ZUPERL U, CUS F, REIBENSCHUH M. Neural control strategy of constant cutting force system in end milling[J]. Robotics and Computer - Integrated Manufacturing,2011,27(3):485-493.
- [8] 黄博豪. 航空叶片切削进给优化研究[D]. 武汉:华中科技大学,2015.
- [9] PARK H S, QI B W, DANG D V, et al. Development of smart machining system for optimizing feedrates to minimize machining time [J]. Journal of Computational Design and Engineering,2018,5(3):299-304.
- [10] 郝文峰. 切削力指令域示波器设计及加工优化研究[D]. 武汉:华中科技大学,2017.
- [11] 张阳,吴宝海,夏卫红,等. 变切深工况下恒定切削力约束的多目标进给量优化方法[J]. 机械工程学报,2021,57(5):242-250.
- [12] 沈号伦,王晨羽,李金泉. 钛合金切削过程进给量对疲劳寿命的影响规律研究[J]. 工具技术,2022,56(8):35-39.
- [13] 梁桂强,姚峰,杜冰. 超声振动与切削工艺参数耦合关系的有限元分析[J]. 机械科学与技术,2025,44(1):40-48.
- [14] 史尧臣,宗姝,李占国,等. 进给量对超声振动钻削力的影响研究[J]. 机床与液压,2019,47(7):54-56,61.
- [15] 王平,李涛. 插铣铣削力模型构建及与切削参数的相关性分析[J]. 组合机床与自动化加工技术,2024(10):22-26,31.
- [16] 周浩淳,金成哲,李治达,等. 车削增材制造 Inconel 718 切削力及预测模型研究[J]. 工具技术,2025,59(3):111-115.

收稿日期:2023-10-30