

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.04.040

新型 2T1R 并联机器人机构运动学分析与工作空间性能优化

廖兴利¹, 温作平², 王媚旺¹, 陈瑞晟¹, 潘坚¹, 卢承宏¹

(1. 温州泰昌铁塔制造有限公司, 浙江 温州 325013; 2. 温州泰昌人防设备有限公司, 浙江 温州 325013)

摘要:针对汽车零部件产品分拣和传送需求,提出一种可用于汽车零部件产品分拣的新型 2T1R 并联机器人机构。利用机器人拓扑结构综合方法设计 2T1R 并联机器人机构,并根据方位特征集计算机机构的自由度。基于几何约束条件推导得到位置逆解和正解表达式,并通过数值解对位置解进行算例验证。分析研究并联机器人机构的奇异性、工作空间优化设计得到一组结构参数最优解。研究结果表明:优化后的转动能力指标和工作空间性能得到显著提升,其中工作空间体积扩大了 2.58 倍,全局转动能力指标增加了 1.3 倍,极大地提高了并联机器人机构的运动性能。

关键词:产品分拣;并联机器人;构型综合;奇异性;工作空间;转动能力

中图分类号:TP242 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2026)04-0207-07

Kinematic Analysis and Workspace Performance Optimization of a Novel 2T1R Parallel Robot Mechanism

Liao Xingli¹, Wen Zuoping², Wang Meiwang¹, Chen Ruisheng¹, Pan Jian¹, Lu Chenghong¹

(1. Wenzhou Taichang Iron Tower Manufacturing Co., Ltd., Wenzhou 325013, China;

2. Wenzhou Taichang Civil Air Defense Equipment Co., Ltd., Wenzhou 325013, China)

Abstract:To meet the requirements for sorting and conveying automotive parts, a novel 2T1R parallel robot mechanism suitable for sorting automotive parts is proposed. The 2T1R parallel robot mechanism is designed using the topological structure synthesis method for robots, and its degrees of freedom are calculated based on the position and orientation characteristic set. Based on geometric constraints, the inverse and forward position solutions are derived, and the position solutions are verified through numerical examples. The singularity of the parallel robot mechanism is analyzed, and a set of optimal structural parameters is obtained through workspace optimization design. The research results showed that the optimized rotational capability index and workspace performance are significantly improved, with the workspace volume increased by 2.58 times and the global rotational capability index increased by 1.3 times, greatly improving the kinematic performance of the parallel robot mechanism.

Keywords: product sorting; parallel robot; topology synthesis; singularity; workspace; rotational capability

0 引言

3 自由度并联机器人因其结构简单、制造成本低、针对性强等优势,在并联机器人领域展现出显著的应用潜力^[1]。根据运动性质划分,3 自由度并联机构主要可分为 2T1R(两平移一旋转)、1T2R(一平移两旋转)和 3T(三平移)等构型。其中,2T1R 并联机构因其独特的运动特性,在工业应用中表现出突出的实用价值^[2-3]。该 2T1R 并联机构不仅能满足工件转移与运输、位姿调整等基本需求,还可作为专用加工工具使用,其应用范围明显优于其他 3 自由度并联机构构型。目前,2T1R 并联机构已在食品加工、医药生产、电子装配及化工制造等领域的物料分拣、产品搬运和自

动化装箱等环节得到了广泛应用^[4]。

近年来,具有 2T1R 运动特征的并联机构引起了国内外研究学者的广泛关注,国内外学者通过构型综合方法得到了一批 2T1R 并联机器人机构^[5]。王琰等^[6]设计了一种新型的双模式 2T1R 并联定位机器人机构。Song 等^[7]基于螺旋理论提出了一类具有合适约束分支的新型 2T1R 非耦合并联机构。Li 等^[8]设计了 3 种 2 自由度 1T1R 和一种 3 自由度的 2T1R 新型空间并联机器人机构。高波等^[9]研究了一种新型的 2T1R 并联机构。基于拓扑结构运动学建模原理进行位置分析,并证明了该机构具有弯曲平移特性。沈惠平等^[10]设计并研究了一种含冗余支链且无寄生运动的 2T1R 并联机器人机构,并分别进行了运动

基金项目:温州市科研项目(ZZG2023013)

第一作者简介:廖兴利(1981—),男,四川自贡人,高级工程师,本科,研究方向为机械设计制造研发、机器人技术, w_jingw@126.com。

学、动力学建模分析。杜中秋等^[11]提出了一种零耦合度且运动部分解耦的空间 2T1R 并联机构。

针对汽车零部件产品转运、分拣需求,本文提出并研究了一种可用于汽车零部件产品分拣的 2T1R 并联机器人机构。根据几何约束条件建立运动学方程,推导计算出位置正解和位置逆解的符号解,研究奇异位形存在的条件,基于位置逆解符号解对并联机器人机构的工作空间进行分析。最后,建立综合工作性能的最优化目标函数,通过遗传算法完成参数的最优化设计。

1 并联机构结构分析

1.1 机构设计

2T1R 并联机器人机构结构如图 1 所示,其三维模型如图 2 所示。支链一为混合支链,其结构是由平面六杆机构(2P4R)和转动副串联而成,其中移动副 P_2 、移动副 P_3 和静平台连接,转动副 R_1 和动平台直接连接。支链二是由转动副 R_{11} 和铰链副、平行四边形机构 Pa 、转动副 R_{14} 串联而成,其中,铰链副是由转动副 R_{12} 和转动副 R_{13} 垂直相交而成,转动副 R_{14} 和动平台直接连接。定义静平台内正方形边长为 $2R$,动平台边长为 $2r$,支链一的移动副 P_2 和转动副 R_{21} 连接长度为 l_3 ,转动副 R_{21} 和转动副 R_{22} 的连杆长度为 l_4 ,转动副 R_1 和转动副 R_{22} 的连杆长度 l_5 ,定义支链二的转动副 R_{11} 和转动副 R_{12} 的连杆长度为 l_1 ,平行四边形机构 Pa 长边的杆长 l_2 。

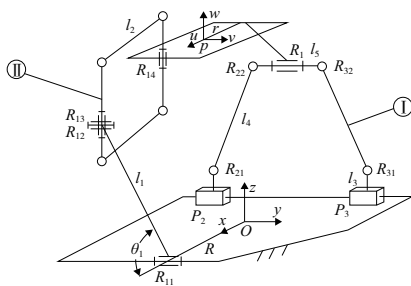


图 1 2T1R 并联机器人机构结构简图

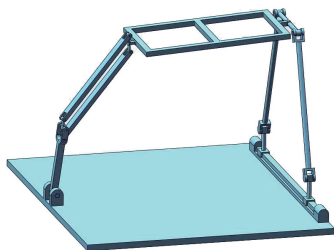


图 2 2T1R 并联机构三维模型

1.2 拓扑特性分析

并联机构自由度、耦合度 κ 计算根据方位特征集拓扑结构综合理论进行计算,具体定义^[12]为

$$\begin{cases} F = \sum_{i=1}^m f_i - \sum_{j=1}^v \xi_{L_j} \\ \xi_{L_j} = \dim. \left\{ \bigcap_{i=1}^j \mathbf{M}_{b_i} \cup \mathbf{M}_{b(j+1)} \right\} \\ \kappa = \frac{1}{2} \min. \left\{ \sum_{j=1}^v |\Delta_j| \right\} \\ \Delta_j = \sum f_i - l_j - \xi_{L_j} \end{cases} \quad (1)$$

式中: F 为自由度; ξ_{L_j} 为第 j 个回路的运动方程数; v 为独立回路数目, $v=m-n+1$; n 为运动副构件个数; m 为运动副数目; f_i 为第 i 个运动副的自由度数; $\bigcap_{i=1}^j \mathbf{M}_{b_i}$ 为前 j 条支链子并联机构的 POC 集; m_j 为第 j 个 SOC _{j} 的运动副数; l_j 为第 j 个 SOC _{j} 的驱动副数; $\mathbf{M}_{b(j+1)}$ 为第 $j+1$ 条支链的 POC 集。

1) 各混合支链位特征集 $\mathbf{M}_{\text{HSOC}_i}$ 分析

$$\begin{cases} \mathbf{M}_{\text{HSOC}_1} = \begin{bmatrix} t^2 \\ r^1 \end{bmatrix} \\ \mathbf{M}_{\text{HSOC}_2} = \begin{bmatrix} t^3 \\ r^2 (\diamond R_{11} R_{13}) \end{bmatrix} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{M}_{\text{HSOC}_1}$ 为混合支链一的方位特征集; $\mathbf{M}_{\text{HSOC}_2}$ 为混合支链二的方位特征集; t 为移动特征; r 为转动特征。

2) 第 1 条独立运动回路的位移方程数计算,将平面六杆机构(2P4R)作为第 1 个独立运动回路,根据式(1),则独立运动回路 1 的位移方程 ξ_{L_1} 为

$$\xi_{L_1} = \dim. \left\{ \begin{bmatrix} t^2 \\ r^1 \end{bmatrix} \cup \begin{bmatrix} t^2 \\ r^1 \end{bmatrix} \right\} = \dim. \left\{ \begin{bmatrix} t^2 \\ r^1 \end{bmatrix} \right\} = 3 \quad (3)$$

3) 第 2 条独立回路的位移方程数计算,以混合支链二和转动副 R_1 作为第 2 个独立运动回路,根据式(1),则独立运动回路 1 的位移方程 ξ_{L_2} 为

$$\xi_{L_2} = \dim. \left\{ \begin{bmatrix} t^3 \\ r^2 (\diamond R_{11} R_{13}) \end{bmatrix} \cup \begin{bmatrix} t^0 \\ r^1 (\diamond R_1) \end{bmatrix} \right\} = 6 \quad (4)$$

4) 计算该 2T1R 并联机器人机构的 POC 集

$$\mathbf{M}_{\text{Pa}(1-2)} = \mathbf{M}_{\text{HSOC}_1} \cap \mathbf{M}_{\text{HSOC}_2} = \begin{bmatrix} t^2 \\ r^1 (\parallel R_1) \end{bmatrix} \quad (5)$$

5) 将参数代入式(1),得到并联机构的自由度 F

$$F = \sum_{i=1}^m f_i - \sum_{j=1}^v \xi_{L_j} = 12 - 6 - 3 = 3 \quad (6)$$

6) 计算约束度 Δ_j 和耦合度, 根据上述步骤代入式(1)中。

$$\begin{cases} \Delta_1 = \sum_{j=1}^{m_j} f_j - I_j - \xi_{L_j} = 6 - 2 - 3 = 1 \\ \Delta_2 = \sum_{j=1}^{m_j} f_j - I_j - \xi_{L_j} = 6 - 1 - 6 = -1 \\ \kappa = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^v |\Delta_j| = 1 \end{cases} \quad (7)$$

综上所述表明, 2T1R 并联机器人机构具有两平移—转动的运动输出, 其耦合度 κ 为 1, 有利于机构的运动学分析。

2 位置分析

2.1 位置正解求解

定义动平台参考点 P 点坐标 (x, y, z) , 动平台姿态角 β , 已知主动副的输入量 (θ_1, d_2, d_3) , 求解执行末端位置 (x, y, z) 和姿态角 β [13]。

1) 分析机构的第 1 条独立运动回路 $A_2-B_2-C_2-D-C_3-B_3-A_3$, 根据参数定义, 可知静坐标系下的坐标矢量 A_i

$$\begin{cases} A_1^0 = (R, 0, 0)^T \\ A_2^0 = (-R, d_2, 0)^T \\ A_3^0 = (-R, d_3, 0)^T \end{cases} \quad (8)$$

2) 可知静坐标系下的坐标矢量 B_i

$$\begin{cases} B_1^0 = (R - l_1 \cos \theta_1, 0, l_1 \sin \theta_1)^T \\ B_2^0 = (-R, d_2, l_3)^T \\ B_3^0 = (-R, d_3, l_3)^T \end{cases} \quad (9)$$

3) 由于 2P4R 机构是平面机构, 平面机构上的线段 C_2C_3 始终和静平台平行, 即 $C_2C_3 // A_2A_3$, 因此, 可知 $Z_{C_2} = Z_{C_3}$, 可得到静坐标系下的坐标矢量 C_i 和 D_1

$$\begin{cases} C_2^0 = (-R, d_3 + l_4 \cos \varphi - 2l_5, l_3 + l_4 \sin \varphi)^T \\ C_3^0 = (-R, d_3 + l_4 \cos \varphi, l_3 + l_4 \sin \varphi)^T \\ D_1^0 = (-R, d_3 + l_4 \cos \varphi - l_5, l_3 + l_4 \sin \varphi)^T \end{cases} \quad (10)$$

4) 由于 $B_2C_2 = l_4$, 根据几何杆长约束条件, 得到以下约束方程

$$(d_3 + l_4 \cos \varphi - 2l_5 - d_2)^2 + (l_4 \cos \varphi)^2 = l_4^2 \quad (11)$$

整理以上等式化简得到以下形式方程

$$A \cos \varphi + B = 0 \quad (12)$$

式中: $A = 2m_1 l_4$; $B = m_1^2$; $m_1 = d_3 + 2l_5 - d_2$ 。

推导得到中间变量 φ 表达式

$$\varphi = 2 \arctan \left(\frac{\pm \sqrt{A^2 - B^2}}{A - B} \right) \quad (13)$$

接下来分析机构的第 2 回路 $A_1-B_1-C_1-D_1$, 由图 3 中的 xoz 投影图形, 分析静坐标系下的坐标矢量 P 、矢量 C_1 、矢量 D_1

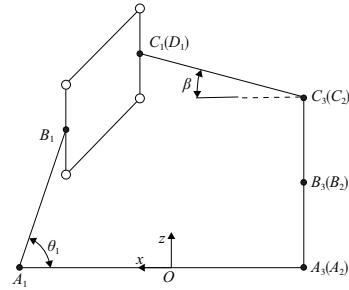


图 3 xoz 投影图形

$$\begin{cases} P^0 = (-R + r \cos \beta, d_3 + l_4 \cos \varphi - l_5, l_3 + l_4 \sin \varphi + r \sin \beta)^T \\ D_1^0 = (x + r \cos \beta, y, z + r \sin \beta)^T \\ C_1^0 = (x + r \cos \beta, y, z + r \sin \beta)^T \end{cases} \quad (14)$$

已知点 P 另外一种表达式 $P^0(x, y, z)$, 得到如下等式

$$\begin{cases} x = -R + r \cos \beta \\ y = d_3 + l_4 \cos \varphi - l_5 \\ z = l_3 + l_4 \sin \varphi + r \sin \beta \end{cases} \quad (15)$$

根据几何杆长约束条件 $B_1C_1 = l_2$, 得到以下约束方程

$$(m_2 + r \cos \beta)^2 + y^2 + (m_3 + r \sin \beta)^2 = l_2^2 \quad (16)$$

式中: $m_2 = x - R + l_1 \cos \theta_1$; $m_3 = z - l_1 \cos \theta_1$ 。

将以上方程分离变量, 整理以上等式化简得到以下形式

$$\begin{cases} E \sin \varphi + G \cos \varphi + H = 0 \\ E = 2m_3 r, G = 2m_2 r, H = y^2 + m_2^2 + m_3^2 + r^2 - l_2^2 \end{cases} \quad (17)$$

计算得到动平台姿态角 β 表达式

$$\beta = 2 \arctan \left(\frac{E \pm \sqrt{E^2 + G^2 - H^2}}{G - H} \right) \quad (18)$$

根据式(15)得到如下等式关系

$$\begin{cases} x = f_1(\theta_1, d_2, d_3) \\ y = f_2(d_2, d_3) \\ z = f_3(\theta_1, d_2, d_3) \end{cases} \quad (19)$$

由于动平台参考点 $P(x, y, z)$ 的 y 仅与主动副的移动副位移相关, 和主动副输入 θ_1 无关。说明该机构具有部分的输入—输出运动解耦, 有利于机构的运动学分析和轨迹控制规划 [14-15]。

2.2 位置逆解求解

已知位姿 (y, z, β) 求解移动副输入 $(d_1, \theta_1, \theta_2)$, 根据式(15)得到 x 和 φ 的表达式

$$\begin{cases} x = -R + r\cos\beta \\ \varphi = \arcsin\left(\frac{z-l_3-r\sin\beta}{l_4}\right) \end{cases} \quad (20)$$

根据图 3 可得坐标矢量 C_i 、 D_i

$$\begin{cases} C_2^0 = (x-r\cos\beta, y-l_5, z-r\sin\beta)^T \\ C_3^0 = (x-r\cos\beta, y+l_5, z-r\sin\beta)^T \\ D_2^0 = (x-r\cos\beta, y, z-r\sin\beta)^T \end{cases} \quad (21)$$

根据杆长约束条件 $B_1C_1=l_2, B_iC_i=l_4 (i=2,3)$, 得到以下运动学方程组

$$\begin{cases} (x+r\cos\beta-R+l_1\cos\theta_1)^2 + y^2 + (z+r\sin\beta-l_1\sin\theta_1)^2 = l_2^2 \\ (y-l_5-d_2)^2 + (z-r\sin\beta-l_3)^2 = l_4^2 \\ (y+l_5-d_3)^2 + (z-r\sin\beta-l_3)^2 = l_4^2 \end{cases} \quad (22)$$

即可求出 d_2, d_3 表达式如下

$$\begin{cases} d_2 = y-l_5 \pm \sqrt{l_4^2 - (z-r\sin\beta-l_3)^2} \\ d_3 = y+l_5 \pm \sqrt{l_4^2 - (z-r\sin\beta-l_3)^2} \end{cases} \quad (23)$$

式中: $m_4 = x+r\cos\beta-R; m_5 = z+r\sin\beta$ 。

将以上方程分离变量,整理以上等式化简得到以下形式

$$E_2\sin\varphi + G_2\cos\varphi + H_2 = 0 \quad (24)$$

式中: $E_2 = 2m_5l_1; G_2 = 2m_4l_1; H_2 = y^2 + m_4^2 + m_5^2 + l_1^2 - l_2^2$ 。

分离变量得到支链 1 的驱动副位移 θ_1 表达式

$$\theta_1 = 2\arctan\left(\frac{E_2 \pm \sqrt{E_2^2 + G_2^2 - H_2^2}}{G_2 - H_2}\right) \quad (25)$$

综上所述表明机构位置逆解存在 8 组,即该机构有 8 种构型。

3 工作空间分析

3.1 可达工作空间分析

工作空间被定义为机构在满足约束条件的前提下,其执行末端所能够到达的运动区域^[16-17]。影响工作空间大小的因素众多,主要包括连杆的长度约束条件、主动副的运动范围限制以及位置逆解的存在条件等^[18-19]。结构参数选择见第 2 节内容,采用蒙特卡罗法进行工作空间搜索^[20-21]。基于 MATLAB 编程搜索得到机构的工作空间,如图 4 所示。

由图 4 分析不难发现:可达工作空间呈桃柱状,工作空间体积为 1.574 m^3 ,工作空间在 xOy 、 xOz 投影面上关于 $x=0.5$ 对称,在 yOz 投影面上关于 $y=0$ 对称(本刊黑白印刷,有疑问请咨询作者)。

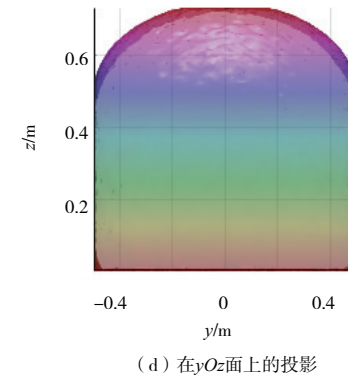
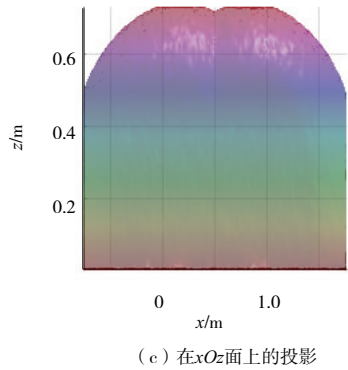
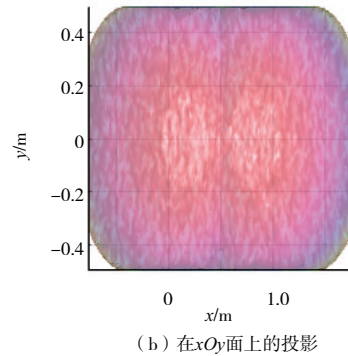
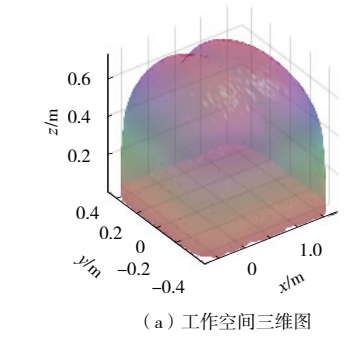


图 4 机构工作空间三维图和投影图

3.2 定姿态工作空间分析

为研究机构的定姿态工作空间,将姿态角从 0° 到 359° 按照间隔 1° 扫描搜索,计算得到不同姿态角下的定姿态工作空间体积,如图 5 所示;并给出姿态角为 $0^\circ, 20^\circ, 90^\circ, 160^\circ$ 的定姿态工作空间形状如图 6 所示。

分析表明:不同姿态角下的工作空间体积分布呈现波浪性分布,最大体积为 0.91 m^3 ,对应的姿态角为 20° 和 160° ,两个波谷的角度为 90° 和 272° 对应体积为 0.41 m^3 和 0.04 m^3 。这表明此并联机器人机构工作空间对姿态角有较大依赖性,且工作空间的形状不同,姿态角为 0° 和 20° 定姿态工作空间形状呈现蹄形,姿态角为 90° 定姿态工作空间其形状为子弹头形,姿态角为 160° 姿态角其形状为梯型形状;这两个姿态角下的定姿态工作空间相对较小。

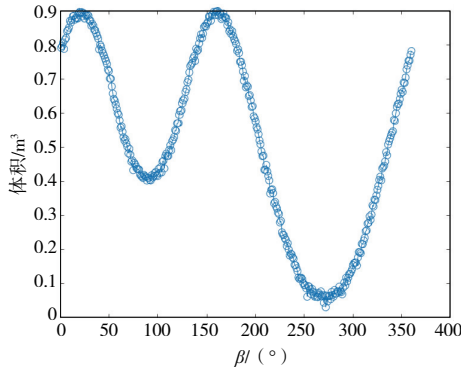
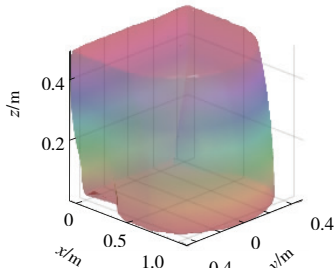
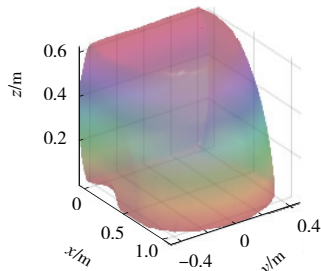


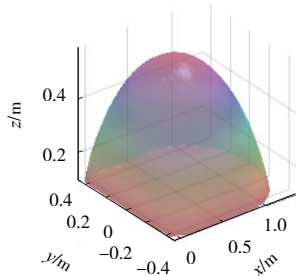
图5 不同姿态角下的工作空间体积分布



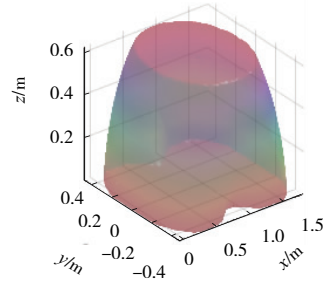
(a) 姿态角=0°的工作空间



(b) 姿态角=20°的工作空间



(c) 姿态角=90°的工作空间



(d) 姿态角=160°的工作空间

图6 不同姿态角下的定姿态工作空间

4 性能优化

工作空间和转动能力直接决定了机器人任务执行的效率、灵活性和适应性。在机器人许多工程场景中,如工业机器人进行零件装配、焊接等工作,工作空间内较大的转动能力指标能够使机器人末端执行器在更大的角度范围内进行转动^[22]。为简化优化模型,将工作空间体积与全局转动能力指标融合为单一目标函数,通过线性加权法构建综合优化目标,从而实现对两项性能指标的同步优化。具体优化目标函数 F_0 如下

$$\max F_0 = 0.5 \frac{V}{V_{\max}} + 0.5 \eta$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} 0.1 \leq R \leq 0.8 \\ 0.1 \leq r \leq 0.3 \\ 0.1 \leq l_1 \leq 0.8 \\ 0.1 \leq l_2 \leq 0.8 \\ 0.1 \leq l_3 \leq 0.7 \\ 0.1 \leq l_4 \leq 0.8 \\ 0.1 \leq l_5 \leq 0.5 \end{cases} \quad (26)$$

式中: $V_{\max}$ 为通过算法优化得到的可达工作空间体积最大值; V 为可达工作空间体积; η 为对应的全局转动能力指标。

采用遗传算法对目标函数进行优化,设定算法参数如下:种群规模 50,迭代次数 100,重组概率 0.9,变异概率 0.05。基于 MATLAB 编程实现优化过程,所得目标函数收敛曲线如图 7 所示,优化后的转动能力切片图,如图 8 所示,优化前后的关键参数对比详见表 1。

优化结果表明,工作空间体积从 1.574 m^3 提升至 5.632 m^3 ,同时全局转动能力指标由 0.271 7 提高至 0.630 0。根据图 8 所示的转动能力分布可知,优化后工作空间中心区域(占比约 70%)可实现完整周向转动。进一步定量分析发现,具备

整周转动能力的区域占总体积的73.59%,较优化前明显扩大。上述结果验证了优化策略的有效性,实现了工作空间体积与转动能力的协同提升。

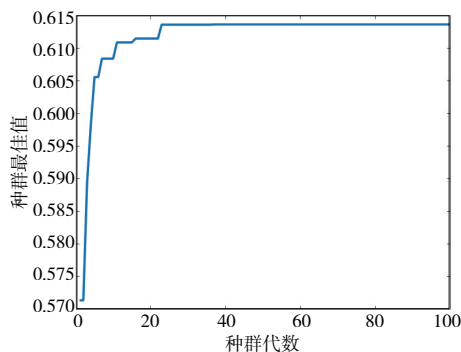


图7 优化迭代曲线

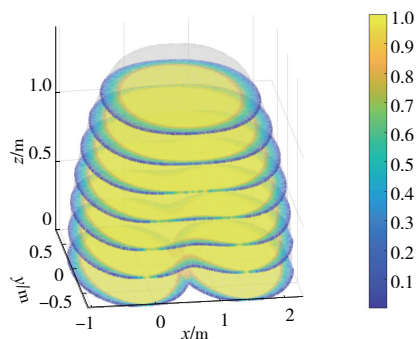


图8 优化后的转动能力切片图

表1 优化后的机构参数

R/m	r/m	l_1/m	l_2/m	l_3/m	l_4/m	l_5/m	V/m^3	η
0.632 2	0.1	0.8	0.8	0.602 2	0.8	0.169 4	5.632	0.630 0

5 结语

1) 提出一种适用于汽车零部件分拣的新型 2T1R 并联机器人机构,研究表明该机构具有运动解耦特性。

2) 分析了该并联机构的奇异位形、工作空间及转动能力。结果表明:机构存在第一类和第二类奇异位形;姿态角变化会显著影响工作空间的体积和形状;转动能力在不同截面高度呈现差异性分布,其中 z 不小于 0.1 时机构可实现整周旋转。

3) 基于加权系数法构建了融合工作空间体积和全局转动能力的单目标优化函数,采用遗传算法进行参数优化。优化结果显示:工作空间体积从 1.574 m^3 提升至 5.632 m^3 ,全局转动能力指标由 0.271 7 提高到 0.630 0,机构综合性能获得显

著改善。

参考文献:

- [1] 王娜,于敏,张永选,等. 新型 2URU-2RSS 并联机器人机构运动学分析多目标优化[J]. 机床与液压, 2024,52(17):28-38.
- [2] 张家祥,刘明东. 一种并联机器人机构工作空间的优化研究[J]. 机械设计与制造,2025(3):267-273.
- [3] Li J, She X Y, Li T, et al. Topological design and kinematic analysis of a new three-translation parallel mechanism[M]//Advances in Mechanism and Machine Science and Engineering in China. Singapore: Springer Nature Singapore,2025:185-196.
- [4] Liang D, Jia H Z, Chang B Y, et al. A novel 3-DOF parallel mechanism for efficient wool harvesting: design, modeling analysis and experimental implementation[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering,2025,47(3):110.
- [5] Wang D B, Zhang J, Guo H W, et al. Design of a 2T1R-type parallel mechanism: performance analysis and size optimization[J]. Actuators,2022,11(9):262.
- [6] 王琰,郭飞飞,梁俊侨,等. 2T1R 印花定位双模式并联机器人机构设计与分析[J]. 组合机床与自动化加工技术,2025(4):71-77.
- [7] Song L M, Zhang Y B, Zhang S, et al. Research on type synthesis of a new class of 2T1R uncoupled parallel mechanism with a suitable constraint branch [J]. Scientific Reports,2025,15:18230.
- [8] Li J, He H B, Wu G L, et al. Three 2-DOF 1T1R and one 3-DOF 2T1R full-hinged novel parallel mechanisms with zero coupling degree and motion decoupling: design and analysis[J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2024,16(3):031003.
- [9] 高波,石志新. 一种具有弯曲平移特性的 2T1R 并联机构设计与位置分析[J]. 机械传动,2024,48(11):92-98.
- [10] 沈惠平,傅增,李菊,等. 无寄生运动 3-DOF 2T1R 并联机构拓扑设计与分析[J]. 农业机械学报,2024,55(6):424-433.
- [11] 杜中秋,沈惠平,李菊,等. 一种位置正解符号化且运动部分解耦的新型 2T1R 并联机构动力学分析[J]. 机电工程,2023,40(8):1231-1239.
- [12] 王芮雪,田宝俊,李瑞琴,等. 基于 3-UPS/PPR 的推拿机器人运动学分析及仿真[J]. 机械传动,2025,49(2):161-169.
- [13] 王欢,马春生,贺阳涛,等. 2-RPU/UPRS 并联机构的构型设计及性能分析[J]. 组合机床与自动化加工技术,2025(2):40-45.
- [14] 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.
- [15] 杨廷力. 机器人机构拓扑结构学[M]. 北京:机械工业出版社,2004:53-87.
- [16] 周亚杰,李毅,张凤奎,等. 一种新型大行程高精度并联微动机构的研究与分析[J]. 机器人, 2023, 45(2):179-186.
- [17] 车林仙,李杰,文世坤,等. 2URR-URU 远中心并联机构性能分析与尺度优化[J]. 机械传动, 2025, 49(4):37-47.
- [18] Yu Z X, Huangfu L X, Yang Y L, et al. Design and control of a novel 3 - DOF parallel MFC micromanipulation platform [J]. Engineering Science and Technology, an International Journal, 2025, 61:101943.
- [19] Tian C, Chen N. Enhancing the motion performance of 3-DOF micro/nano - manipulators facing thermo - piezoelectric-mechanical coupling effects[J]. Sensors and Actuators A:Physical, 2025, 381:116036.
- [20] 韩旭焰,杨新刚,张小粉. 2P3RR 并联机构灵巧性分析[J]. 机械制造与自动化, 2025, 54(1):53-57.
- [21] Shen H P, Tang Y, Ceccarelli M, et al. Design and analysis of a new non-parasitic parallel mechanism for 2T1R motion[J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2025, 17:014501.
- [22] 姚璐,谢聪琳,史春海. 5 自由度混联机器人设计与运动学分析[J]. 科技和产业, 2025, 25(8):86-90.

收稿日期:2025-06-09

(上接第 172 页)

- [3] 宗晓明,高飞,韩红雨. 十字轴万向节用滚针轴承承载问题研究[J]. 智能制造, 2019(7):51-56.
- [4] 曹杰,任尊松,查浩,等. 高速动车组齿轮箱轴承载荷特性研究[J]. 机械工程学报, 2024, 60(15):173-184.
- [5] 汪静静,牛荣军,张海,等. 螺栓型滚轮滚针轴承有效额定载荷的数值计算[J]. 轴承, 2020(9):5-9.
- [6] 冯成慧,王斌团,王乾平,等. 航空滚轮滚针轴承试验研究与寿命估算[J]. 轴承, 2018(12):39-42, 65.
- [7] 田昀,王晓北,刘立成,等. 空间机构用推力滚针轴承摩擦阻力矩分析[J]. 轴承, 2022(6):55-59.
- [8] 宋琦,王优强,竺俊杰,等. 杂质颗粒对滚针轴承润滑特性影响研究[J]. 润滑与密封, 2024, 49(9):32-41.
- [9] 任永强,李广涛,潘浩,等. 基于机器视觉的变速箱滚针轴承漏针检测研究[J]. 机床与液压, 2020, 48(4):19-22.
- [10] 黄五羊,张俊. 一种轨道交通车辆轴承拆卸装置的设计及应用[J]. 现代机械, 2024(5):53-56.
- [11] 陶文嘉,刘成,李建朋,等. 大型矿用减速器行星轮轴承拆卸装置的设计与应用[J]. 矿山机械, 2022, 50(11):61-65.
- [12] 娄智旭,邱明,周彩虹,等. 高速 V 型兜孔滚针轴承保持架结构优化[J]. 航空动力学报, 2025, 40(7):434-443.
- [13] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会. 滚动轴承 无内圈冲压外圈滚针轴承 外形尺寸、产品几何技术规范:GB/T 12764—2019[S]. 北京:中国标准出版社, 2019:10.
- [14] 熊伟,葛志华,庞乔,等. 轮毂轴承单元过盈量理论设计及试验研究[J]. 工程设计学报, 2021, 28(1):41-47.
- [15] 卢学明. 纯水液压支架油缸活塞杆包覆过盈量设计[J]. 煤矿机械, 2022, 43(2):8-10.
- [16] 梯形螺纹:GB/T 5796.3—2022[S].
- [17] 杨满. 金属材料手册[M]. 北京:机械工业出版社, 2025.
- [18] 杨国栋,魏兵. 实用紧固件手册[M]. 4 版. 北京:机械工业出版社, 2022.
- [19] 涂杰,罗强. 大型风电齿轮箱行星架-销轴系统有限元分析[J]. 机床与液压, 2018, 46(21):169-172.
- [20] 王晨光,王海航,杨杰,等. 孔挤压量对碳纤维增强复合材料孔壁损伤与疲劳性能的影响[J]. 机械工程学报, 2025, 61(7):134-143.
- [21] 刘艳秋,胡建忠,王蔓,等. 机械设计基础[M]. 2 版. 北京:清华大学出版社, 2023.
- [22] 罗赞,莫名韶,李胜军. 一种机械手电液控制回路的设计与仿真[J]. 机械制造与自动化, 2025, 54(4):174-178, 199.

收稿日期:2025-09-26