

2 - PUR - PSR 并联机构尺度综合多目标优化

张伟中^{1,2} 李金平³ 叶敏⁴ 杨超⁵

(1. 浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018; 2. 浙江机电职业技术学院自动化学院, 杭州 310058;
3. 新南威尔士大学土木与环境工程学院, 悉尼 NSW 2052; 4. 长安大学工程机械学院, 西安 710064;
5. 嘉兴学院机电工程学院, 嘉兴 314001)

摘要: 针对由外副驱动的三自由度两转一移并联机构运动学性能优化问题, 提出一种尺度综合多目标优化设计方法。首先, 运用螺旋理论分析机构的运动学性能; 其次, 将可达工作空间离散为 n 层, 采用极坐标方法计算每层高度的最大内切圆, 通过数值方法计算由每层最大内切圆构成的规则圆台工作空间体积; 然后, 以规则工作空间体积和全局运动/力传递指标为目标函数, 以驱动限制和关节转角限制为约束条件, 以机构参数为设计变量; 最后, 采用多目标粒子群优化算法得到目标函数的 Pareto 最优解集。结果显示, 两个目标函数之间存在相互冲突, Pareto 前沿的全局运动/力传递性能 (GTI) 最优值比优化前提高了 57.57%, 规则工作空间体积 (V_r) 最优值比优化前提高了 37.59%, 证明了优化方法的有效性。

关键词: 并联机构; 工作空间; 多目标优化; 粒子群算法

中图分类号: TH112 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)11-0403-08

OSID:



Multi-objective Optimization of Dimensional Synthesis for 2 - PUR - PSR Parallel Manipulator

ZHANG Weizhong^{1,2} LI Jinping³ YE Min⁴ YANG Chao⁵

(1. Faculty of Mechanical Engineering and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China
2. Faculty of Automation, Zhejiang Institute of Mechanical and Electrical Engineering, Hangzhou 310058, China
3. School of Civil and Environmental Engineering, University of New South Wales, Sydney NSW 2052, Australia
4. School of Construction Machinery, Chang'an University, Xi'an 710064, China
5. College of Mechanical and Electrical Engineering, Jiaxing University, Jiaxing 314001, China)

Abstract: Aiming at the problem of kinematic performance optimization of three degree of freedom (3-DOF) two rotations and one translations parallel mechanism driven by outer pair, a multi-objective optimization design method of the dimension synthesis was proposed. The Screw theory was used to analyze the kinematics performance and obtain the inverse solution of the position for the parallel mechanism. The reachable workspace was divided into n layers, the polar coordinate method was used to calculate the maximum inscribed circle at each layer, and the numerical method was adopted to calculate the volume of the regular workspace of the frustum of a cone formed by the maximum inscribed circle of each layer. Considering the volume of the regular workspace and global motion/force transmission index as the objective functions, driving range and rotation angle of joints as the constraint conditions, and the mechanism parameters as the design variables, the multi-objective particle swarm optimization algorithm was used to find the Pareto optimal front of the objective functions, the results showed that the two objective functions conflicted with each other. The optimal value of GTI at the front of Pareto was increased by 57.57% compared with that before optimization, and the optimal value of V_r was increased by 37.59% compared with that before optimization. The comparison results before and after optimization showed effectiveness of the optimization algorithm.

Key words: parallel manipulator; workspace; multi-objective optimization; particle swarm algorithm

收稿日期: 2020-07-29 修回日期: 2020-08-21

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFE0120200)、浙江省基础公益研究计划项目(LGG19E050018)和嘉兴市公益性研究计划项目(2020AY10013)

作者简介: 张伟中(1978—),男,博士生,浙江机电职业技术学院副教授,主要从事并联机器人研究,E-mail: zhangweizhong@zime.edu.cn

通信作者: 杨超(1982—),男,讲师,博士,主要从事并联机器人研究,E-mail: yangchaox@163.com

0 引言

少自由度并联机构具有结构简单、高承载能力、高刚度、高精度以及优异的运动/力传递性能和动态性能等优势,有效地弥补了串联机构的不足^[1-3]。其中,三自由度两转一移(Two rotations and one translations, 2R1T)并联机构已广泛应用于诸多领域,如 Z3 主轴头^[4]、Exechon 机器人^[5-6]、Tricept 并联机床^[7]和振动筛^[8]等。

尽管 2R1T 并联机构得到了广泛的应用研究,但该类机构的优化设计问题仍未得到很好的解决。运动学性能评价指标和参数优化算法是机构运动学优化设计的主要内容^[9-11]。

由于并联机构工作空间相对较小,机构性能优化设计首先需考虑通过优化设计变量获得更大的规则工作空间^[12-15]。MASORY 等^[16]在考虑关节转角约束、杆长约束及杆件干涉的基础上,采用数值积分方法得到了较为接近实际的机构工作空间。CARBONE 等^[17]采用二进制表达方法得到了可达工作空间体积的数值表达式。RAMANA 等^[18]采用极坐标方法得到了规则工作空间的极大内切圆柱体积的表达式。BOUNAB^[19]计算了 Delta 并联机构的规则圆球工作空间体积。以上研究将可达工作空间或圆柱、圆球作为规则空间,没有考虑不同高度下的工作空间最大化。

性能分析是并联机构进行尺度综合的前提,而构建合理的运动学指标是并联机构运动学性能分析的重要基础。GOSSELIN 等^[20]以雅可比矩阵条件数作为机构的性能评价指标。陈修龙等^[21]以雅可比矩阵的奇异值作为性能指标,对并联机器人进行结构优化设计。对于混自由度并联机构(包含移动和转动),雅可比矩阵中的元素量纲并不统一,直接计算上述指标会导致机构性能物理意义上的模糊和解释错误。LIU 等^[22-23]提出了运动/力性能传递指标,该指标具有量纲统一、与坐标系无关、可判断机构的奇异位置等优点,该运动学指标在很多机构分析中得到应用。

尺度综合是以性能指标为衡量标准对机构的尺寸参数进行优化设计,目前主要借助空间模型法对机构进行尺度综合^[24]。在工程应用中,往往需要借助智能优化算法对并联机构进行多目标优化,以达到多个目标的综合最优。ZHANG 等^[25]使用差分进化算法使 3-UPU 并联机构的刚度和可达工作空间最大化。崔国华等^[26]基于 Isight 优化了 3-UPS-S 并联机构的工作空间、灵巧度、承载能力和刚度。孙小勇等^[27]通过优化数学模型对 6-PSS 并联机构的工作空间和动力学性能进行了多目标优化。ZHANG 等^[28]使用遗传算法对球形机构的全局条件

数和工作空间进行了多目标优化。

本文以 2-PUR-PSR 并联机构为例,对其进行结构参数的优化设计,在运动学模型分析基础上,结合螺旋理论,以规则圆台工作空间和全局运动/力传递性能为目标函数,以关节转角和驱动限制为约束条件,采用多目标粒子群优化算法进行尺度综合多目标优化设计,得到满足工作条件的机构规则工作空间和运动/力传递性能的 Pareto 最优,为得到性能更优的机构提供设计依据。

1 机构描述与运动学分析

1.1 机构描述

如图 1 所示,由机架、动平台、两条结构完全相同的 PUR 分支和一条 PSR 分支组成了 2-PUR-PSR 并联机构。该机构是为了减小由内副驱动的 2-UPR-SPR 并联机构在操作过程中的运动质量,并提高机构的刚度进行构型综合,提出的一种由外副驱动的两转一移并联机构^[29-30]。机构由固接于机架导轨上的线性驱动器驱动^[31-32]。

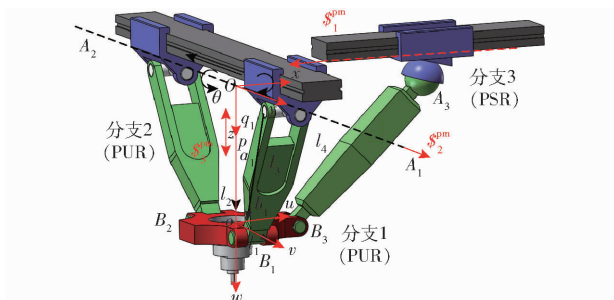


图 1 2-PUR-PSR 并联机构

Fig. 1 2-PUR-PSR parallel manipulator

通过驱动 P 副,3 条分支结构与机架的导轨相连。在 2 条 PUR 分支结构中,U 副的第 1 个转轴共线,且与其 P 副的移动方向一致;U 副的第 2 个转轴则垂直于 P 副的移动方向,同时平行于另一端和动平台相连接的 R 副轴线方向;并且 PUR 分支的两个 R 铰轴线互相平行。S 铰是 PSR 分支与基座相连的点,并与动平台相连的 R 铰轴线与 B_1B_2 平行。其中: A_i 表示分支 i ($i=1, 2, 3$) 中与基座相邻运动副的中心, A_1, A_2, A_3 3 个点在同一水平面内。分支 1, 2 中虎克铰中心用 B_1, B_2 表示;分支 3 中与动平台相邻的转动副中心用 B_3 表示。

2-PUR-PSR 并联机构定/动坐标系原点为 A_1A_2 中点, x 轴指向 A_2 点, y 轴指向 A_3 点, z 轴遵循右手法则,从而建立固定坐标系 $Oxyz$ 。与此同时,以 B_1 点为原点,指向 B_2 点为 u 轴,垂直于 u 轴且位于面 $B_1B_2B_3$ 内为 v 轴, w 轴遵循右手法则,从而在动平台上建立局部坐标系 $puvw$ 。以 A_1A_2 的中心点 O 为原点,与 OA_3 共线为 x 轴,沿着 OA_1 方向为 y 轴,由右手

螺旋法则确定 z 轴, 建立定坐标系 $Oxyz$ 。以 B_1B_2 的中心点为原点, 与 oB_3 重合为 u 轴, 指向点 B_1 为 v 轴, 由右手法则确定 w 轴, 建立动坐标系 $ouvw$ 。

对 2-PUR-PSR 并联机构的结构参数定义为: $oB_1 = oB_2 = l_1, oB_3 = l_2, A_1B_1 = A_2B_2 = l_3, A_3B_3 = l_4$, 并且为减少尺寸参数的个数, 假定满足 $l_1l_4 = l_2l_3$ 。采用文献[33-34]提出的螺旋理论对机构进行分析, 可求得 2-PUR-PSR 并联机构为三自由度机构, 分别是 2 个转动和 1 个移动自由度。

1.2 位置逆解

已知 2-PUR-PSR 机构末端点 o 的位置矢量为 $\mathbf{p} = (x, y, z)^T$, 求解驱动 P 副的移动距离即为机构的位置逆解问题。

由图 1 可知, 在 2-PUR-PSR 并联机构中, 动坐标系 $ouvw$ 相对于定坐标系 $Oxyz$ 的姿态可表示为

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_z(\varphi) \mathbf{R}_y(\theta) \mathbf{R}_x(\psi) = \begin{bmatrix} c\theta c\varphi & s\psi s\theta c\varphi - c\psi s\varphi & c\psi s\theta c\varphi + s\psi s\varphi \\ c\theta s\varphi & s\psi s\theta s\varphi + c\psi c\varphi & c\psi s\theta s\varphi - s\psi c\varphi \\ -s\theta & s\psi c\theta & c\psi c\theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 $\mathbf{R}_z(\varphi)$ 、 $\mathbf{R}_y(\theta)$ 、 $\mathbf{R}_x(\psi)$ ——绕 z 轴、 y 轴、 x 轴的旋转矩阵

c 表示余弦函数, s 表示正弦函数。

根据图 1 可得, 闭环矢量方程为

$$\mathbf{q}_i = \mathbf{p} + \mathbf{b}_i - \mathbf{a}_i \quad (i = 1, 2, 3) \quad (2)$$

式中, 分支 i 驱动器的位置矢量为 $\mathbf{q}_i$; 从点 A_i 到 B_i 和从点 o 到 B_i 的位置矢量, 分别表示为 $\mathbf{a}_i$ 和 $\mathbf{b}_i$, 且 $\mathbf{b}_i = \mathbf{R}\mathbf{b}_{io}$, oB_i 位置矢量在动坐标系 $\{o\}$ 下表示为

$$\begin{cases} \mathbf{b}_{1o} = (0, l_1, 0)^T \\ \mathbf{b}_{2o} = (0, -l_1, 0)^T \\ \mathbf{b}_{3o} = (l_2, 0, 0)^T \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} q_1 = (-zc\theta + s\theta \sqrt{l_4^2 - l_2^2 \sec^2 \phi s^2 \theta + l_4^2 \tan^2 \phi s^2 \theta - z^2 \sec^2 \phi} + 2l_2 z \sec^2 \phi s\theta + l_2 c\theta s\theta) \tan \phi / (\tan^2 \phi s^2 \theta + 1) + \\ \sqrt{l_3^2 - z^2 \sec^2 \theta - l_1^2 s^2 \phi - 2l_1 z \sec \theta s\phi} + l_1 \phi \\ q_2 = -(zc\theta - s\theta \sqrt{l_4^2 - l_2^2 \sec^2 \phi s^2 \theta + l_4^2 \tan^2 \phi s^2 \theta - z^2 \sec^2 \phi} + 2l_2 z \sec^2 \phi s\theta - l_2 c\theta s\theta) \tan \phi / (\tan^2 \phi s^2 \theta + 1) - \\ \sqrt{l_3^2 - z^2 \sec^2 \theta - l_1^2 s^2 \phi - 2l_1 z \sec \theta s\phi} - l_1 c\phi \\ q_3 = (l_2 c\theta + z \sec^2 \phi \tan \theta + \sqrt{l_4^2 + l_4^2 \tan^2 \phi s^2 \theta - z^2 \sec^2 \phi - l_2^2 \sec^2 \phi s^2 \theta + 2l_2 z \sec^2 \phi s\theta}) / (\tan^2 \phi s^2 \theta + 1) \end{cases} \quad (14)$$

2 规则工作空间指标

规则工作空间是并联机构的一个重要指标, 可以作为优化目标函数之一。在研究规则工作空间之前有必要先对机构的可达工作空间进行研究。并联机构的可达工作空间是指在物理约束下机器人至少从一个方向可以达到的所有点的集合。影响并联机

同时, $\mathbf{c}_i = \mathbf{R}\mathbf{c}_{io}$ 是分支 i 中 R 铰轴线的方向矢量, $\mathbf{c}_{io}$ 为 $\mathbf{c}_i$ 在动坐标系 $ouvw$ 中的方向矢量, 表示为

$$\begin{cases} \mathbf{c}_{1o} = (1, 0, 0)^T \\ \mathbf{c}_{2o} = (1, 0, 0)^T \\ \mathbf{c}_{3o} = (0, 1, 0)^T \end{cases} \quad (4)$$

机构分析可知, 机构在运动过程中, 各分支的 R 副轴线始终与 $\mathbf{q}_i - \mathbf{p}$ 垂直, 因此可得

$$\mathbf{c}_i^T (\mathbf{q}_i - \mathbf{p}) = 0 \quad (5)$$

展开可得各分支的约束关系

$$xc\theta c\varphi - (q_1 - y)c\theta s\varphi - zs\theta = 0 \quad (6)$$

$$xc\theta c\varphi + (q_2 + y)c\theta s\varphi - zs\theta = 0 \quad (7)$$

$$y(c\psi c\varphi + s\psi s\theta s\varphi) + (q_3 - x)(c\psi s\varphi - s\psi s\theta c\varphi) \quad (8)$$

式(6)、(7)相减可得

$$(q_1 + q_2)c\theta s\varphi = 0 \quad (9)$$

在运动过程中, $q_1 + q_2$ 不可能恒等于 0, 为此

$$c\theta s\varphi = 0 \quad (10)$$

式(10)代入式(6)中, 可得

$$xc\theta c\varphi - zs\theta = 0 \quad (11)$$

由式(11)可得, 假定 $c\theta = 0$, 则恒有 $z = 0$, 这不符合机构的实际运动情况, 故 $s\varphi = 0, \varphi = 0$ 或 $\varphi = \pi$ 。根据 2-PUR-PSR 并联机构的结构特征, φ 不可能等于 π , 因此 φ 恒为 0。将该结果代入式(8)中, 可得

$$yc\psi - (q_3 - x)s\psi s\theta + zs\psi c\theta = 0 \quad (12)$$

综合式(11)、(12), 位置矢量 $\mathbf{p} = (x, y, z)^T$ 中的 x 和 y 可表示为

$$\begin{cases} x = z \tan \theta \\ y = (q_3 - z \tan \theta) \tan \psi s\theta - z \tan \psi c\theta \end{cases} \quad (13)$$

将式(13)代入式(2)中, 得到 2-PUR-PSR 并联机构的位置逆解为

构工作空间的主要因素包括机构的结构尺寸、铰链的转角范围、驱动的限制以及各支链之间的干涉等。

采用极坐标的方法计算 2-PUR-PSR 并联机构的规则圆台工作空间体积^[19]。首先, 利用空间搜索法得到可达工作空间的形状, 为下一步计算规则工作空间做准备。其次, 将操作平台高度划分为 n 层。最终, 计算每一个操作平台高度下可达空间的

最大内切圆半径。得到了每一层的最大内切圆半径后便计算规则圆台的工作空间体积,计算公式为

$$V_r = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{2} (A_i + A_{i+1}) \Delta z$$

(15)

式中 A_i ——第 i 层最大内切圆的面积

Δz ——层间的高度间隔区间

给定 2-PUR-PSR 并联机构的物理约束为

$$\begin{cases} |\alpha_{i1}|_{\max} \leq 50^\circ \\ |\alpha_{i2}|_{\max} \leq 50^\circ \\ q_{\min} \leq q_i \leq q_{\max} \end{cases}$$

(16)

式中, $q_{\min} = 50 \text{ mm}$ 和 $q_{\max} = 800 \text{ mm}$ 分别为驱动的最小和最大限制, α_{i1} 和 α_{i2} 分别表示第 i 分支的 R 铰和 U 铰的转角,其可以通过运动学分析得到

$$\begin{cases} \alpha_{i1} = \arccos(\boldsymbol{n}_{li}, \boldsymbol{n}_{pi}) \\ \alpha_{i2} = \arccos(\boldsymbol{n}_{li}, \boldsymbol{n}_{bi}) \end{cases}$$

(17)

式中, $\boldsymbol{n}_{li}$ 、 $\boldsymbol{n}_{pi}$ 、 $\boldsymbol{n}_{bi}$ 表示杆件、动平台法线和定平台法线的单位矢量。2-PUR-PSR 并联机构在优化前的初始机构参数为 $l_1 = l_2 = 200 \text{ mm}$, $l_3 = l_4 = 400 \text{ mm}$ 。本文采用空间搜索法给出机构的可达离散工作空间如图 2 所示,可达工作空间关于 $\gamma = 0^\circ$ 对称,与 2-PUR-PSR 并联机构的结构吻合。可达工作空间的形状和尺寸不规则,不利于轨迹的规划和算法控制。实际工程应用中一般采用规则工作空间,不失一般性,本文采用每一给定操作平台高度下可达空间的最大内

切圆构成的圆台作为机构的规则工作空间,如图 2 所示,为了确保末端执行器的姿态要求,此处将内切圆的最小半径设置为 10° 。

3 运动/力传递性能

3.1 局部传递指标

并联机构的本质作用之一是在机构的输入端和输出端之间传递运动和力。研究者据此特性,定义相应的能够同时体现运动和力的传递能力的指标,用以分析并联机构的运动/力传递特性^[35-36]。

陈祥等^[37]根据力传递性能与传动角的密切关系,提出利用运动/力传递指标(LTI)作为运动学性能评价指标,利用该指标表示机构从输入到输出的传递效率。LTI 指标可表示为

$$\lambda_i = \frac{|\$_{Ai} \circ \$_{Ti}|}{|\$_{Ai} \circ \$_{Ti}|_{\max}}$$

(18)

$$\eta_i = \frac{|\$_{Oi} \circ \$_{Ti}|}{|\$_{Oi} \circ \$_{Ti}|_{\max}}$$

(19)

式中 λ_i ——分支 i 的输入传递指标(ITI)
 η_i ——输出传递指标(OTI)
 $\$_{Ai}$ ——分支 i 的输入运动螺旋(ITS)
 $\$_{Oi}$ ——分支 i 的输出运动螺旋(OTS)
 $\$_{Ti}$ ——分支 i 的传递力螺旋(TWS)

从式(18)、(19)中可知 λ_i 和 η_i 的取值范围均为 $0 \sim 1$;同时值越接近于 1,机构的运动/力传递性能越好。对 ITI 和 OTI 综合考虑,局部运动/力传递指标(LTI)可以表达为

$$LTI = \min \{ \lambda_i, \eta_i \}$$

(20)

从式(20)可以看出,LTI 计算值的范围为 $0 \sim 1$,是一个与坐标系无关的无量纲指标,其值越接近 1,表示能量从机构输入端到输出端的传递效率越高。

如图 1 所示,以机构分支 1 为例,其运动螺旋系和约束螺旋表达式为

$$\begin{cases} \$_{11} = (0, 0, 0; 0, 1, 0) \\ \$_{12} = (c\theta, 0, -s\theta; -q_1 s\theta, 0, -q_1 c\theta) \\ \$_{13} = (0, 1, 0; 0, 0, 0) \\ \$_{14} = (c\theta, 0, -s\theta; -y_{B_1} s\theta, z_{B_1} c\theta + x_{B_1} s\theta, -y_{B_1} c\theta) \end{cases}$$

(21)

$$\begin{cases} \$_{21}^r = (-c\theta, 0, s\theta; 0, 0, 0) \\ \$_{22}^r = (0, 0, 0; s\theta, 0, c\theta) \end{cases}$$

(22)

由于机构分支 1 的驱动关节为 P 副,为此 $\$_{A1} = \$_{11}$ 。传递力螺旋 $\$_{T1}$ 与机构分支 1 中被动关节的互易积为零,即

$$\$_{T1} \circ \$_{1i} = 0 \quad (i = 2, 3, 4)$$

(23)

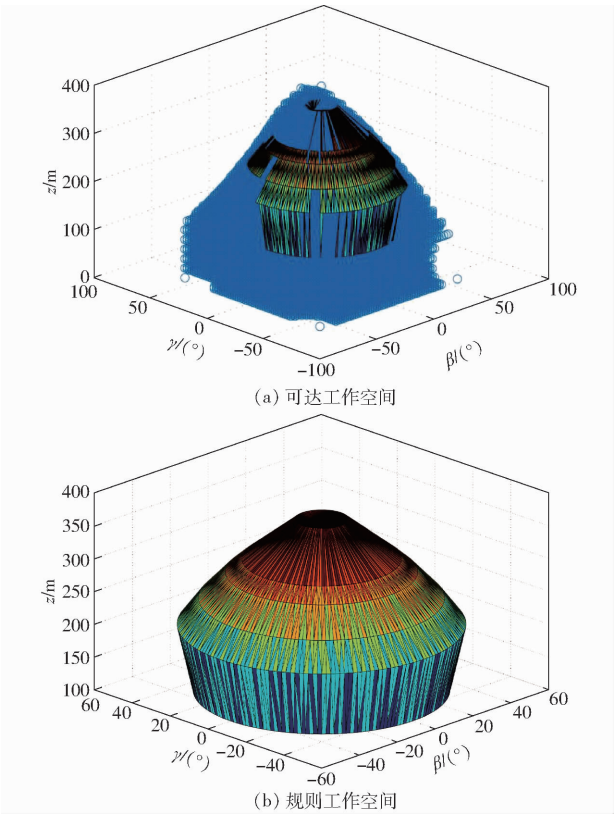


图 2 2-PUR-PSR 并联机构工作空间
Fig. 2 Workspaces of 2-PUR-PSR parallel manipulator

通过式(21)、(23)可计算得传递力螺旋 $\$_{T1}$ 表达式为

$$\$_{T1} = (\mathbf{a}_1/|\mathbf{a}_1|; \mathbf{q}_1 \times \mathbf{a}_1/|\mathbf{a}_1|) \tag{24}$$

式中 $\$_{T1}$ ——过点 A_1 、沿 $\mathbf{a}_1$ 方向的力螺旋

同理,其余 2 个分支的传递力螺旋分别为

$$\$_{T2} = (\mathbf{a}_2/|\mathbf{a}_2|; \mathbf{q}_2 \times \mathbf{a}_2/|\mathbf{a}_2|) \tag{25}$$

$$\$_{T3} = (\mathbf{a}_3/|\mathbf{a}_3|; \mathbf{q}_3 \times \mathbf{a}_3/|\mathbf{a}_3|) \tag{26}$$

式中 $\$_{T2}$ ——过点 A_2 、沿 $\mathbf{a}_2$ 方向的力螺旋

$\$_{T3}$ ——过点 A_3 、沿 $\mathbf{a}_3$ 方向的力螺旋

锁住机构除分支 1 之外的所有驱动关节,机构分支 2 和 3 中的传递力螺旋变成约束螺旋,机构的约束螺旋系为 $\mathbf{U}^1 = [\$_{C1} \$_{C2} \$_{C3} \$_{T2} \$_{T3}]$,其维度为 5,此时机构为单自由度机构,动平台的瞬时运动可通过输出运动螺旋表示为

$$\$_{o1} \circ \mathbf{U}^1 = 0 \tag{27}$$

式中 $\$_{o1}$ ——过点 A_3 且沿 A_2A_3 方向的运动螺旋

由式(27)可得输出运动螺旋的表达式为

$$\begin{aligned} \$_{o1} = & ((\mathbf{q}_3 - \mathbf{q}_2)/|\mathbf{q}_3 - \mathbf{q}_2|; \mathbf{q}_2 \times (\mathbf{q}_3 - \mathbf{q}_2)/|\mathbf{q}_3 - \mathbf{q}_2|) \\ & \tag{28} \end{aligned}$$

同理,其余两种情况的输出运动螺旋也可通过该方法得到,分别表示为过点 A_3 且沿 A_1A_3 方向和过点 A_1 且沿 A_1A_2 方向的运动螺旋。

3.2 全域传递指标

由于 LTI 指标仅能判断机构在单个位形下的运动/力传递性能,而机构往往在一个特定的工作空间内运行,需要在一个工作空间内去评价机构的运动/力传递性能。为此,定义全局传递指标 (GTI) 去评价机构在全域的运动学性能指标,表达式为

$$GTI = \frac{\int_{V_r} LTI dV_r}{\int dV_r} \tag{29}$$

在实际计算过程中,采用离散点的数值方法计算 GTI,表达式为

$$GTI = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n LTI_i \tag{30}$$

式中 n ——规则工作空间的离散点的数量

GTI 指标越高,意味着机构的运动学性能越好。

4 多目标优化

多目标优化是指同时优化彼此互相冲突的多个目标函数,多目标优化问题的解不唯一,而是一组均衡解,称为非劣解集或 Pareto 最优解集,且这组解无差别。它是由任一个目标函数值的提高都必须以牺牲其他目标函数值为代价的解组成的。所谓非劣解是指由这样一些解组成的集合(又称非劣解集):与

集合之外的任何解相比它们至少有一个目标函数比集合之外的解优,而其他目标函数又不比集合之外的解差。本文以第 2 节和第 3 节构建的规则圆台工作空间和 GTI 作为目标函数,为了将目标函数值控制在同一个量级,将工作空间的体积乘以系数 10^{-3} ,多目标优化的数学模型为

$$\begin{cases} \text{目标函数:} \begin{cases} \min f_1 = -10^{-3} V_r \\ \min f_2 = -GTI \end{cases} \\ \text{设计变量: } \mathbf{x}_{dmin} \leq \mathbf{x}_d = (l_1, l_2, l_3) \leq \mathbf{x}_{dmax} \\ \text{约束条件:} \begin{cases} q_{min} \leq q_i \leq q_{max} \\ |\alpha_i| \leq \alpha_{max} \end{cases} \end{cases} \tag{31}$$

其中 $\mathbf{x}_{dmin} = (150, 150, 350) \text{ mm}$
 $\mathbf{x}_{dmax} = (250, 250, 450) \text{ mm}$

式中 $\mathbf{x}_d$ ——设计参数矢量

为了求解式(31)的多目标优化问题,采用多目标粒子群 (MPSO) 优化算法,粒子群 (PSO) 算法的基本思想是模拟鸟群的觅食行为,群体中每一个体被看作一个在 D 维搜索空间中没 有体积和质量的“粒子”,空间的维数 D 即为自变量的个数。每一个粒子通过跟踪两个极值来更新自身的空间位置和飞行速度,其中一个极值为单个粒子在自身迭代过程中的最优解粒子,称为个体极值;另一个极值为种群在迭代过程中的最优解粒子,称为全局极值。迭代的过程中粒子会根据自身经验(个体极值)和种群交流(全局极值)来调整搜寻方向和速度,直至找到全局最优解。粒子群算法根据自己的速度决定搜索,替代了遗传算法复杂的交叉和变异操作,具有收敛速度快的优点。

假设种群由 N 个粒子组成,在 D 维搜索空间进行搜索,第 i 个粒子的个体最优位置记为 $\mathbf{p}_i = (p_{i1}, p_{i2}, \cdots, p_{iD})$ ($i = 1, 2, \cdots, N$),全局最优位置记为 $\mathbf{p}_g = (p_{g1}, p_{g2}, \cdots, p_{gD})$,粒子根据这两个最优值更新自己的速度和位置,即

$$\begin{aligned} v_{ij}(t+1) = & \omega v_{ij}(t) + c_1 r_1(t) (p_{ij}(t) - x_{ij}(t)) + \\ & c_2 r_2(t) (p_{gi}(t) - x_{ij}(t)) \end{aligned} \tag{32}$$

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1) \tag{33}$$

式中 ω ——动态惯性权重

c_1, c_2 ——学习因子,表示粒子跟踪自己历史最优值和全局最优值的权重

r_1, r_2 ——分布于 $[0, 1]$ 区间的随机数

式(32)的第 1 部分表示粒子之前的速度,用于保证算法的全局收敛性,第 2、3 部分保证算法具有局部收敛的能力。采用的粒子群优化算法参数设置如表 1 所示。

图 3 给出了多目标优化的 Pareto 前沿,左下角

表 1 粒子群优化算法的参数设置

Tab.1 Parameter setting of particle swarm optimization algorithm					
参数	种群大小	最大迭代代数	惯性权重范围	学习因子 c_1	学习因子 c_2
	100	600	[0.2,1.1]	1.49	1.49

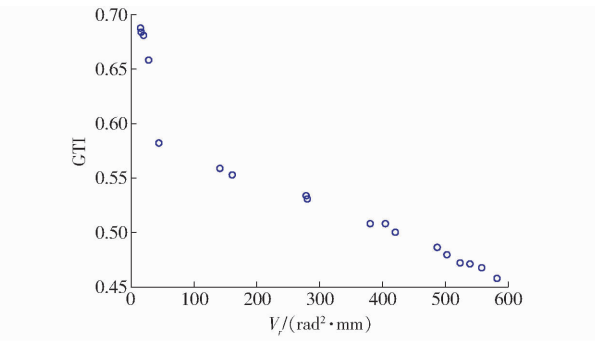


图 3 目标函数 V_r 和 GTI 的 Pareto 前沿

Fig.3 Pareto front of objective functions V_r and GTI

区域的解属于被支配解,右上角区域的解属于不可达到的解。由图可以看出,由于多目标之间的竞争和耦合关系 Pareto 前沿并不是光滑的曲线分布。图中运动学/力传递性能 GTI 与 V_r 成反比,GTI 越大, V_r 越小。说明 GTI 与 V_r 关于结构的几何参数存在竞争关系,无法在 Pareto 前沿上得到运动学性能与工作空间体积均取得最优的情况,设计人员需要根据两者的权重在 Pareto 前沿上得到两者的均衡点,从而减少了设计时间。

表 2 给出了 Pareto 前沿的 18 组最优解集以及优化前的机构参数及目标函数值。第 1 组对应的设计参数(151.92,150.50,402.17)mm 对应的工作空间的体积达到了极值 582 $\text{rad}^2 \cdot \text{mm}$,比优化前提高了 37.59%,GTI 却只有 0.458;第 2 组设计参数(169.60,219.09,449.09)mm 对应的 GTI 达到了极大值 0.687,比优化前提高了 57.57%,但缩小了工作空间的体积。也就是说 2-PUR-PSR 并联机构的运动学性能与工作空间之间存在着竞争关系,不能同时达到两者的最优,需要工程人员根据需要在两者之间做出取舍。

不失一般性,图 4 给出了优化后的第 2 组设计参数在平面 $z = 0.25 \text{ m}$ 中的 LTI 指标分布图,可以看出指标关于 $\psi = 0$ 对称,这与机构的对称性是吻合的。图中还可以看出,LTI 的最大值不是在初始位置 $(\psi, \theta) = (0^\circ, 0^\circ)$ 处而是发生在 $(\gamma, \beta) = (0^\circ, 10^\circ)$ 附近的位置。

基于参数优化结果,并考虑加工与装配工艺性,选取其中 1 组结构参数尺寸,给出该 2-PUR-PSR 并联机构的设计方案,绘制三维模型图,加工制作样

表 2 Pareto 前沿的最优解集以及优化前的机构参数及目标函数值

Tab.2 Optimal solutions and optimization of Pareto frontier and previous mechanism parameters and objective function values					
	l_1/mm	l_2/mm	l_3/mm	GTI	$V_r/(\text{rad}^2 \cdot \text{mm})$
优化前	200	200	400	0.436	423
	151.92	150.50	402.17	0.458	582
	169.60	219.09	449.09	0.687	16
	155.69	187.66	433.49	0.531	280
	153.91	174.53	429.48	0.508	381
	161.67	200.82	440.41	0.553	162
	151.63	157.29	401.32	0.467	557
	152.89	197.20	431.83	0.558	142
	153.03	159.20	417.67	0.478	503
	152.40	160.70	421.92	0.486	487
	164.22	214.73	444.14	0.681	20
	153.96	151.87	419.07	0.472	523
	171.08	221.01	446.94	0.684	17
	152.55	166.18	439.43	0.508	405
	176.82	223.97	446.92	0.658	28
	154.13	185.00	436.93	0.534	279
	161.35	210.45	438.73	0.582	45
	152.90	170.81	424.88	0.500	420
优化后	151.03	151.66	417.99	0.471	539

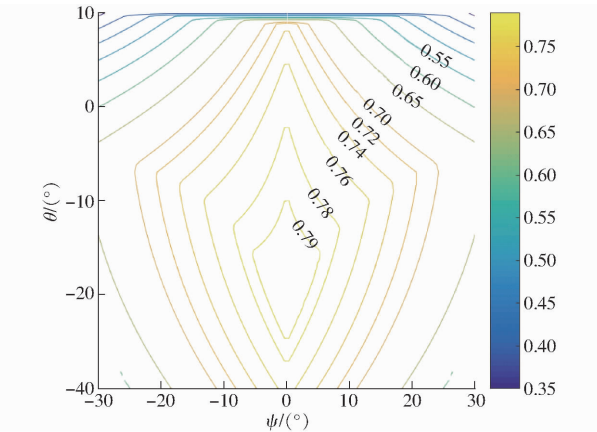


Fig.4 Distribution of LTI of 2-PUR-PSR parallel manipulator in plane $z = 0.25 \text{ m}$

机如图 5 所示,该机构驱动器均设置在装置的机架上,机构运动时电机不会跟随机构杆件一同运动,从而减轻了机构运动质量,进而减轻了装置的负荷,提高了装置的驱动能力。因此,这种机构具有较好的运动稳定性、实时控制性强等优点。

5 结论

(1)提出了基于极坐标方法的规则圆台工作空间体积的计算方法,以 2-PUR-PSR 为研究对象,

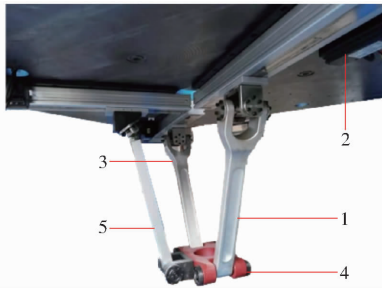


图 5 2-PUR-PSR 样机

Fig. 5 Prototype of 2-PUR-PSR

1. 分支 1(PUR) 2. 驱动电机 3. 分支 2(PUR) 4. 动平台 5. 分支 3(PSR)

以规则工作圆台空间体积和 GTI 为目标函数,以驱动限制和关节转角限制为约束条件,以机构参数为

设计变量,建立了 2-PUR-PSR 并联机构尺度综合多目标优化数学模型。

(2) 基于 MPSO 算法得到了 2-PUR-PSR 并联机构尺度综合多目标优化的 Pareto 前沿,给出了 18 组 Pareto 最优解集,节约了设计时间。Pareto 前沿的 GTI 最优值比优化前提高了 57.57%, V_r 最优值比优化前提高了 37.59%,证明了优化方法的有效性。

(3) 建立的 2-PUR-PSR 并联机构的尺度综合多目标优化模型也同样适用于其他同类型的并联机构。以机构在给定工作空间内具有优良的运动/力传递性能为目标,实现其尺度参数优选,可为后续机构刚度、运动学误差、动力学等性能分析以及样机制造奠定基础。

参 考 文 献

- [1] HUANG Zhen, LI Qinchuan, DING Huafeng. Theory of parallel mechanisms[M]. Dordrecht: Springer, 2012.
- [2] XU Lingmin, CHAI Xinxue, LI Qinchuan, et al. Design and experimental investigation of a new 2R1T overconstrained parallel kinematic machine with actuation redundancy[J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2019, 11(3): 031016.
- [3] 叶伟, 李秦川, 张克涛. 一种运动部分解耦的 2R2T 并联机构运动学与性能分析[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(1): 374-381.
YE WEI, LI Qinchuan, ZHANG Ketao. Kinematics and performance analysis of 2R2T parallel manipulator with partially decoupled motion[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 374-381. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190143&flag=1. DOI: 10.041/j.issn.1000-1298.2019.01.043. (in Chinese)
- [4] KIM H S. Design optimization of a cartesian parallel manipulator[J]. Journal of Mechanical Design, 2003, 125(1): 865-872.
- [5] TAYLOR R, JENSEN P, WHITCOMB L, et al. A steady-hand robotic system for microsurgical augmentation[J]. The International Journal of Robotics Research, 1999, 18(12): 1201-1210.
- [6] HENNES N, STAIMER D. Application of PKM in aerospace manufacturing-high performance machining centers ECOSPEED, ECOSPEED-F and ECOLINER[C]//Proceedings of the 4th Chemnitz Parallel Kinematics Seminar, 2004: 557-568.
- [7] URIARTE L, ZATARAIN M, AXINTE D, et al. Machine tools for large parts[J]. CIRP Annals—Manufacturing Technology, 2013, 62(2): 731-750.
- [8] 刘剑敏, 马履中, 许子红, 等. 振动筛两平移两转动并联机构的运动学分析[J]. 农业机械学报, 2008, 39(2): 59-62.
LIU Jianmin, MA Lüzhong, XU Zihong, et al. Kinematical analysis of vibrating screen on a kind of 2T-2R parallel mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(2): 59-62. (in Chinese)
- [9] SUN Tao, SONG Yimin, LI Yonggang, et al. Workspace decomposition based dimensional synthesis of a novel hybrid reconfigurable robot[J]. Journal of Mechanisms & Robotics, 2010, 2(3): 191-220.
- [10] HOSSEINI M A, DANIALI H M, TAGHIRAD H D. Dexterous workspace optimization of a Tricept parallel manipulator[J]. Advanced Robotics, 2011, 25(13-14): 1697-1712.
- [11] SUN Tao, SONG Yimin, LI Yonggang, et al. Dimensional synthesis of a 3-DOF parallel manipulator based on dimensionally homogeneous Jacobian matrix[J]. Science China Technological Sciences, 2010, 53(1): 168-174.
- [12] NARIMAN-ZADEH N, SALEHPOUR M, JAMALI A, et al. Pareto optimization of a five-degree of freedom vehicle vibration model using a multi-objective uniform-diversity genetic algorithm (MUGA)[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2010, 23(4): 543-551.
- [13] CHI Zhongzhe, ZHANG Dan, XIA Lian, et al. Multi-objective optimization of stiffness and workspace for a parallel kinematic machine[J]. International Journal of Mechanics and Materials in Design, 2013, 9(3): 281-293.
- [14] HUANG Guanyu, GUO Sheng, ZHANG Dan, et al. Kinematic analysis and multi-objective optimization of a new reconfigurable parallel mechanism with high stiffness[J]. Robotica, 2017, 36(2): 1-17.
- [15] GAO Zhen, ZHANG Dan, GE Yunjian. Design optimization of a spatial six degree-of-freedom parallel manipulator based on artificial intelligence approaches[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2010, 26(2): 180-189.
- [16] MASORY O, WANG J, ZHUANG H. On the accuracy of a stewart platform. II. kinematic calibration and compensation[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1993, 1: 725-731.
- [17] CARBONE G, OTTAVIANO E, CECCARELLI M. An optimum design procedure for both serial and parallel manipulators[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C—Journal of Mechanical Engineering Science, 2007, 221(7): 829-

843.

- [18] RAMANA B S, RAMACHANDRA R V, KOONA R. Design for optimal performance of 3 - RPS parallel manipulator using evolutionary algorithms[J]. Transactions Canadian Society for Mechanical Engineering, 2013, 37(2):135 - 160.
- [19] BOUNAB B. Multi-objective optimal design based kineto-elastostatic performance for the delta parallel mechanism[J]. Robotica, 2014, 34(2):258 - 273.
- [20] GOSSELIN C M, ANGELES J. A global performance index for the kinematic optimization of robotic manipulators[J]. ASME Journal of Mechanical Design, 1991, 113(3):220 - 226.
- [21] 陈修龙, 蒋德玉, 陈林林, 等. 冗余并联机构运动学性能分析与优化[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(6):340 - 347. CHEN Xiulong, JIANG Deyu, CHEN Linlin, et al. Kinematics performance analysis and optimal design of redundant actuation parallel mechanism[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(6):340 - 347. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160645&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.06.045. (in Chinese)
- [22] LIU Xinjun, WANG Jinsong. A new methodology for optimal kinematic design of parallel mechanisms[J]. Mechanism and Machine Theory, 2007, 42(9):1210 - 1224.
- [23] WU C, LIU X J, WANG J. Force transmission analysis of spherical 5R parallel manipulators [C] // Reconfigurable Mechanisms and Robots, 2009. ASME/IFTOMM International Conference on. IEEE, 2009:331 - 336.
- [24] LIU Xinjun, WU Chao, WANG Jinsong. A new approach for singularity analysis and closeness measurement to singularities of parallel manipulators[J]. ASME Journal of Mechanisms Robotics, 2012, 4(4):041001.
- [25] ZHANG Dan, BIN Wei. Interactions and optimizations analysis between stiffness and workspace of 3 - UPU robotic mechanism [J]. Measurement Science Review, 2017, 17(2):83 - 92.
- [26] 崔国华, 周海栋, 王南, 等. 基于 Isight 的 3 - UPS - S 并联机器人机构多目标优化[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(9):261 - 266. CUI Guohua, ZHOU Haidong, WANG Nan, et al. Multi-objective optimization of 3 - UPS - S parallel mechanism based on Isight[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(9):261 - 266. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20130945&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.09.045. (in Chinese)
- [27] 孙小勇, 郑彬, 鲍捷, 等. 高速 6 - PSS 并联机器人参数优化设计[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(5):372 - 378. SUN Xiaoyong, ZHENG Bin, BAO Jie, et al. Parameter optimization design of high-speed 6 - PSS parallel robot [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(5):372 - 378. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150552&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.05.052. (in Chinese)
- [28] ZHANG Xiaoli, NELSON C A. Multiple-criteria kinematic optimization for the design of spherical serial mechanisms using genetic algorithms[J]. Journal of Mechanical Design, 2011, 133(1):819 - 827.
- [29] LI Qinchuan, HERVE J M. Type synthesis of 3 - DOF RPR-equivalent parallel mechanisms [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2014, 30(6):1333 - 1343.
- [30] LI Qinchuan, XU Lingmin, CHEN Qiaohong, et al. New family of RPR-equivalent parallel mechanisms; design and application [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 30(2):217 - 221.
- [31] LI Qinchuan. 1T2R parallel mechanisms without parasitic motion[M]. IEEE Press, 2010.
- [32] 张伟中, 徐灵敏, 童俊华, 等. 2 - PUR - PSR 并联机构的运动学分析及尺度综合[J]. 机械工程学报, 2018, 54(7):45 - 53. ZHANG Weizhong, XU Lingmin, TONG Junhua, et al. Kinematic analysis and dimensional synthesis of 2 - PUR - PSR parallel manipulator[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(7):45 - 53. (in Chinese)
- [33] CHEN Zhengshen, XU Lingming, ZHANG Weizhong, et al. Closed-form dynamic modeling and performance analysis of an over-constrained 2PUR - PSR parallel manipulator with parasitic motions[J]. Nonlinear Dynamics, 2019, 96:517 - 534.
- [34] YANG C, CHEN Qiaohong, TONG Huajun, et al. Elastostatic stiffness analysis of a 2PUR - PSR overconstrained parallel mechanism[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2019, 20(4):569 - 581.
- [35] WANG J S, WU C, LIU X J. Performance evaluation of parallel manipulators; motion/force transmissibility and its index[J]. Mechanism and Machine Theory, 2010, 45(10):1462 - 1476.
- [36] CHEN C, ANGELES J. Generalized transmission index and transmission quality for spatial linkages[J]. Mechanism and Machine Theory, 2007, 42(9):1225 - 1237.
- [37] 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 manipulators[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(3):1 - 9. (in Chinese)