

doi:10.3969/j.issn.2095-0411.2019.01.007

一种并联式太阳追踪机构设计与参数优化

李寒冰,朱 伟,沈惠平,刘晓飞,马致远

(常州大学 机械工程学院,江苏 常州 213164)

摘要:设计了一种新型 2PUS-2PRU 并联机构,推导了该机构的位置逆解方程和雅克比矩阵;分析了机构的工作空间、灵巧度等运动性能指标,以及主要设计参数对运动性能的影响;以全局条件数为目标函数,给出机构的结构影响因子和尺寸范围等约束条件,并采用遗传算法优化设计出最佳参数值。结果表明,机构优化后的工作空间明显变大,灵巧度也得到显著改善。并研究了该机构在追踪太阳轨迹上的应用,得到四个不同时刻太阳追踪模拟图、装置转角的变化曲线图,结果表明:该机构完全满足太阳追踪的转角要求。

关键词:太阳追踪;并联机构;工作空间;灵巧度;优化设计

中图分类号:TH 112

文献标志码:A

文章编号:2095-0411(2019)01-0041-09

Design and Parameter Optimization of A Parallel Solar Tracking Mechanism

LI Hanbing, ZHU Wei, SHEN Huiping, LIU Xiaofei, MA Zhiyuan

(School of Mechanical Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

Abstract: A new 2PUS-2PRU parallel mechanism is designed. Firstly the inverse solution and the Jacobian matrix are analyzed. Secondly based on the study of the motion performance, the workspace and dexterity are determined, and the influence of main design parameters on the performance is analyzed. Taking the number of global conditions as the objective function, the constraint conditions such as the structure influence factor and size range of the mechanism are obtained. In addition, the optimal parameter value is solved by using the MATLAB genetic algorithm toolbox. The results show that the workspace is obviously enlarged and the dexterity of the parallel mechanism is improved significantly. Finally the application of the mechanism in the trajectory tracking of sun are studied, while the tracking simulation diagram of sun at four different times and the change curve of the mechanism are obtained. The results show that the mechanism meets the requirements of the rotation angle of solar

收稿日期:2018-08-31。

基金项目:江苏省自然科学基金项目资助(BK20161192)。

作者简介:李寒冰(1992—),男,江苏泰兴人,硕士生。通信联系人:朱伟(1976—),E-mail:zwllx@126.com

引用本文:李寒冰,朱伟,沈惠平,等.一种并联式太阳追踪机构设计与参数优化[J].常州大学学报(自然科学版),2019,31(1):41-49.

tracking fully.

Key words: solar tracking; parallel mechanism; workspace; dexterity; optimum design

太阳自动追踪装置可根据太阳的实时位置自动转动进行能量收集,可始终保持与太阳光垂直状态,从而最大限度地收集太阳光能。目前,已有的太阳追踪机构主要有单轴或双轴两种^[1],前者单独采用竖直转轴结构、水平转轴结构或斜轴结构^[2-4],只能单自由度(Degree Of Freedom,简称:DOF)转动,其结构简单,成本低廉,太阳能收集效率比固定式装置有所提高;后者通常由水平转轴和垂直转轴串联组成^[5-6],可实现两自由度转动,不受季节和昼夜的影响,使收集器的方位始终垂直于太阳辐射,具有更好的追踪性能。

相对于串联机构,并联机构具有更高的刚度、精度和承载能力。根据太阳运动规律,具有 2-DOF(自由度)转动的球面并联机构可满足追踪要求,如 5R 球面机构、RR+PRR 全解耦球面机构^[7]、Carri-cato^[8]提出的两耦合自由度并联机构等(R 表示转动副,P 表示移动副)。具有三自由度的球面并联机构拥有不错的承载能力与转动性能,如 3-RRR 球面并联机构^[9]、3-UPS/S 移动副驱动球面并联机构^[10]、3-UPU 球面并联机构^[11]等(U 表示虎克铰,S 表示球铰)。这类球面并联机构多应用于定位跟踪^[12]、腕关节^[13]及球面加工^[9,14]等方面,用于太阳追踪方面的设计较少,如张顺心等^[15-16]采用 3RRR 球面机构设计了一种双轴太阳跟踪装置。

尽管太阳跟踪装置可提高能量收集率,但同时也在消耗能量。为了尽可能减少能量消耗,通过减少机构质量或采用被动支链,降低能量消耗,如 Rolland^[17]提出 2SPU-U 机构。本文建议一种 4-DOF 直线驱动并联追踪机构,可用于支撑大型太阳收集器的运动,亦可考虑利用收集板的重力势能驱动支链中的滑块运动,从而节约驱动能量。文中以全局条件数为目标函数,采用遗传算法优化机构的尺度参数,并设计机构的结构模型。

1 机构描述

机构由两条 PRU 支链和两条 PUS 支链以及动、静平台组成,三维图如图 1 所示。第 1,3 支链为 PRU 支链,滑块 P_{i1} 通过固定支架 B_iC_i 与 R_{i2} 副连接, R_{i2} 副与 U_{i3} 副通过中间杆 A_iC_i 相连($i=1,3$), U_{i3} 副与动平台联结,其中转动副 R_{i2} 轴线与滑块 P_{i1} 移动方向垂直, U_{i3} 副的两条转轴 jR_{i3} 垂直($j=1,2$),其中一条转轴与 R_{i2} 副轴线平行。第 2,4 支链为 PUS 支链, U_{i2} 副与滑块通过固定支架 B_iC_i 连接, U_{i2} 副与球副 S_{i3} 通过中间杆 A_iC_i 相连($i=2,4$),球副 S_{i3} 与动平台相连, U_{i2} 副的两条转轴 jR_{i2} 相互垂直($j=1,2$)。结构原理图如图 2 所示。

在静平台中心 O 点建立静坐标系 $O-xyz$, x 轴沿 OB_1 方向, y 轴沿 OB_2 方向, z 轴竖直向上。在动平台中心 P 点建立动坐标系 $P-uvw$, u 轴沿 OA_1 方向, v 轴沿 OA_2 方向, w 轴竖直向上。根据图 2 的拓扑结构,机构动平台可实现四自由度运动,即绕 x,y 轴转动和沿 x,z 轴移动。

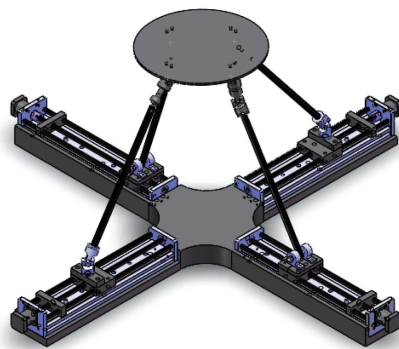


图 1 三维结构图

2 机构运动学分析

2.1 位置反解

设四条支链中驱动副的输入长度 s_i ($i=1,2,3,4$), 动平台为半径为 r_a 的圆, 杆 A_iC_i 的长度为 l_i 。由于机构运动输出为两平移两转动, 可假设机构动平台中心 P 点的位置为 x_p, y_p, z_p , 绕 x, y 轴转动的姿态角分别为 α, β , 则动坐标系 $O-xyz$ 相对静坐标系 $P-uvw$ 的基本旋转矩阵为

$${}^B\mathbf{R}_A = \begin{bmatrix} \cos \beta & \sin \beta \sin \alpha & \sin \beta \cos \alpha \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ -\sin \beta & \cos \beta \sin \alpha & \cos \beta \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (1)$$

根据图2中矢量关系, 可得矢量方程

$$s_i \mathbf{b}_i + h_i \mathbf{c}_i + l_i \mathbf{e}_i = \mathbf{P} + r_a {}^B\mathbf{R}_A \mathbf{a}_i \quad (2)$$

式中: \mathbf{a}_i, r_a 分别为 PA_i 的单位矢量和长度; \mathbf{b}_i, s_i 分别为 OB_i 的单位矢量和长度; \mathbf{c}_i, h_i 分别为固定支架 B_iC_i 的单位矢量和长度; \mathbf{e}_i, l_i 分别为 C_iA_i 的单位矢量和长度; $\mathbf{a}_i = \mathbf{b}_i = (\cos \varphi_i \quad \sin \varphi_i \quad 0)^T$ ($i=1,2,3,4$), $\varphi_i = (i-1)\pi/2$; $\mathbf{c}_i = (0 \quad 0 \quad 1)^T$ 。

根据 A_iC_i 杆长约束条件, 将式(2)整理后平方, 可得四元四次方程组

$$\begin{cases} (r_a \cos \beta + x_p - d_1)^2 + (y_p)^2 (-r_a \sin \beta + z_p - h_1)^2 + (z_p - r_a \sin \beta - h_1)^2 = l_1^2 \\ (r_a \sin \beta \sin \alpha + x_p)^2 + (r_a \cos \alpha + y_p - d_2)^2 + (r_a \cos \beta \sin \alpha + z_p - h_2)^2 = l_2^2 \\ (-r_a \cos \beta + x_p + d_3)^2 + (r_a \sin \beta + z_p - h_3)^2 + (y_p)^2 = l_3^2 \\ (x_p - r_a \sin \beta \sin \alpha)^2 + (y_p - r_a \cos \alpha + d_4)^2 + (-r_a \cos \beta \sin \alpha + z_p - h_4)^2 = l_4^2 \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)可求解出机构的反解方程

$$s_i = k_i \pm \sqrt{l_i^2 - f_i} \quad (i=1,2,3,4) \quad (4)$$

式中: $k_1 = r_a \cos \beta + x_p$; $k_2 = r_a \cos \alpha + y_p$; $k_3 = r_a \cos \beta - x_p$; $k_4 = r_a \cos \alpha - y_p$; $f_1 = y_p^2 + (-r_a \sin \beta + x_p - h_1)^2$; $f_2 = (r_a \sin \alpha \sin \beta + x_p)^2 + (r_a \cos \alpha \sin \alpha + z_p - h_2)^2$; $f_3 = y_p^2 + (r_a \sin \beta + x_p - h_3)^2$; $f_4 = (-r_a \sin \alpha \sin \beta + x_p)^2 + (-r_a \cos \alpha \sin \alpha + z_p - h_4)^2$ 。

2.2 机构的雅克比矩阵

对 2PUS-2PRU 并联机构的位置约束关于时间的方程式(4)的等式两边求导, 整理可得并联机构驱动副的输入速度矩阵 $\mathbf{v}_p = [\dot{s}_1 \quad \dot{s}_2 \quad \dot{s}_3 \quad \dot{s}_4]^T$ 和动平台输出速度矩阵 $\mathbf{v}_q = [\dot{x} \quad \dot{z} \quad \dot{\alpha} \quad \dot{\beta}]^T$ 之间的映射关系, 表示为

$$\mathbf{J}_p \mathbf{v}_p = \mathbf{J}_q \mathbf{v}_q \quad (5)$$

式中: \mathbf{J}_p 为输入速度雅克比矩阵; \mathbf{J}_q 为输出速度雅克比矩阵。

$$\mathbf{J}_p = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & G_{13} & G_{14} \\ G_{21} & G_{22} & G_{23} & G_{24} \\ G_{31} & G_{32} & G_{33} & G_{34} \\ G_{41} & G_{42} & G_{43} & G_{44} \end{bmatrix} \quad \mathbf{J}_q = \begin{bmatrix} R_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{44} \end{bmatrix}$$

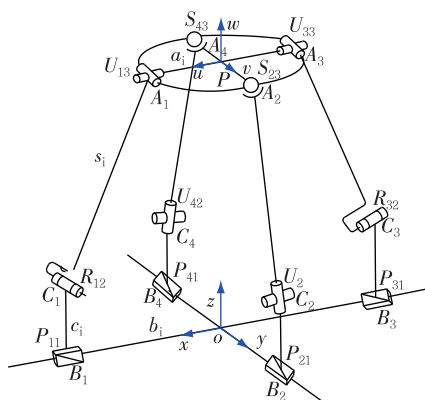


图2 机构简图

式中: $G_{11}=M_{11}$; $G_{12}=M_{13}$; $G_{13}=0$; $G_{14}=-r_a M_{11} \sin \beta - M_{13} r_a \cos \beta$; $G_{21}=M_{21}$; $G_{22}=M_{23}$; $G_{23}=r_a (M_{31} \sin \beta \cos \alpha - M_{22} \sin \alpha)$; $G_{24}=r_a (M_{21} \cos \beta \sin \alpha - M_{23} \sin \alpha \sin \beta)$; $G_{31}=M_{31}$; $G_{32}=M_{33}$; $G_{33}=0$; $G_{34}=r_a (M_{31} \sin \beta + M_{33} \cos \beta)$; $G_{41}=M_{41}$; $G_{42}=M_{43}$; $G_{43}=r_a (M_{42} \sin \alpha - M_{41} \sin \beta \cos \alpha - M_{43} \cos \beta \cos \alpha)$; $G_{44}=r_a (M_{43} \sin \alpha \sin \beta - M_{41} \cos \beta \sin \alpha)$ 。

$M_{11}=r_a \cos \beta + x_p - s_1$; $M_{13}=-r_a \sin \beta + z_p - h_1$; $M_{21}=r_a \sin \beta \sin \alpha + x_p$; $M_{22}=r_a \cos \alpha + y_p - s_2$; $M_{23}=r_a \cos \beta \sin \alpha + z_p - h_2$; $M_{31}=-r_a \cos \beta + x_p + s_3$; $M_{33}=r_a \sin \beta + z_p - h_3$; $M_{41}=-r_a \sin \beta \sin \alpha + x_p$; $M_{42}=-r_a \cos \alpha + y_p + s_4$; $M_{43}=-r_a \cos \beta \sin \alpha + z_p - h_4$; $R_{11}=M_{11}$; $R_{22}=M_{22}$; $R_{33}=-M_{31}$; $R_{44}=-M_{42}$ 。

机构的速度雅克比矩阵为

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_q^{-1} \mathbf{J}_p \quad (6)$$

若 \mathbf{J}_q 非奇异,则

$$\mathbf{v}_q = \mathbf{J} \mathbf{v}_p \quad (7)$$

若 \mathbf{J}_p 非奇异,则

$$\mathbf{v}_p = \mathbf{J}^{-1} \mathbf{v}_q \quad (8)$$

3 运动学性能分析

3.1 工作空间确定

本机构工作空间的主要约束条件包括驱动滑块的行程约束、运动副转角约束及连杆间的干涉。

滑块位于滑轨上不能无限制水平移动,设定 4 个驱动长度为 s_i ($i=1,2,3,4$),则滑块沿 x 轴或 y 轴方向上行程的约束条件可以表示为: $s_{\min} \leq s_i \leq s_{\max}$ 。

2PUS-2PRU 机构中动平台与定长杆通过球副或虎克铰相连,因此需对球副的转角范围进行约束。球副的约束条件可表示为

$$\theta_{bi} = \arccos\left(\frac{\mathbf{n}_{qi} \mathbf{n}_{li}}{|\mathbf{n}_{qi}| |\mathbf{n}_{li}|}\right) \leq \theta_{b\max} \quad (i=2,4) \quad (9)$$

式中: θ_{bi} 为球铰的转角; \mathbf{n}_{li} 为定杆长的单位方向矢量; \mathbf{n}_{qi} 为球铰定基座的单位方向矢量; $\theta_{b\max}$ 为球铰最大许用转角。

如图 2 机构简图所示,需要对定长杆 $A_i C_i$ 与水平滑轨 OB_i 之间的夹角 ρ_i 的大小进行约束,约束条件可表示为

$$\rho_{\min} \leq \rho_i \leq \rho_{\max}$$

本机构主要包括驱动滑块的行程约束、运动副转角约束及连杆间的干涉约束,约束条件可表示为

$$\begin{cases} s_{\min} \leq s_i \leq s_{\max} \\ \theta_{bi} \leq \theta_{b\max} \\ \rho_{\min} \leq \rho_i \leq \rho_{\max} \end{cases} \quad (10)$$

设定动平台姿态角 α, β 的运动范围为 $\pm 70^\circ$,考虑到机构的有效工作空间,搜索高度 z 设定为 $[50, 450]$ 。根据如图 2 所示的机构简图,设定相关几何参数见表 1。

利用极限边界搜索法对 2PUS-2PRU 并联机构进

表 1 机构几何参数

参数	数值
r_a/mm	70
r_b/mm	500
s_{\min}/mm	50
s_{\max}/mm	400
z/mm	50~450
$\alpha, \beta/(\circ)$	-70~70
$l_i (i=1,2,3,4)/\text{mm}$	280
$\theta_{b\max}/(\circ)$	60
$\rho_{\min}/(\circ)$	30
$\rho_{\max}/(\circ)$	90

行定姿态工作空间搜索,得到机构所有可达点的集合,如图 3 所示。由图可知,机构可达的转动工作间范围较大,当 $z=180$ mm 附近, α, β 转角达到最大 $\pm 60^\circ$,当 $z>230$ mm,工作空间关于 α, β 转角工作空间随着 z 的增大而逐步减小, z 的可达工作空间范围在 $[140, 300]$ mm 之间。

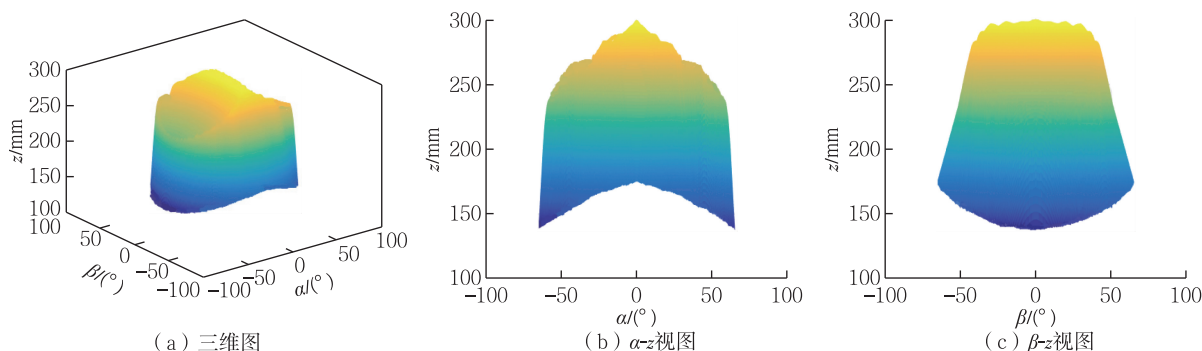


图 3 工作空间图形

3.2 灵巧度的确定

由机构雅克比矩阵分析可知,主动构件输入速度 \mathbf{v}_p 与动平台输出速度 \mathbf{v}_q 之间满足关系式

$$\mathbf{v}_q = \mathbf{J} \mathbf{v}_p \quad (11)$$

式中:矩阵 \mathbf{J} 为机构的速度雅可比矩阵。

由式(11)可知,机构驱动副位移输入与动平台输出之间的速度传递精度取决于雅克比矩阵 \mathbf{J} 。为了衡量机构在某一位置的机构速度传递性能,可引用局部条件数 $C(\mathbf{J})$ 来表示为

$$C(\mathbf{J}) = \|\mathbf{J}\| \cdot \|\mathbf{J}^{-1}\| \quad (12)$$

设定灵巧度指标 L_{ci} 为

$$L_{ci} = 1/C(\mathbf{J}) \quad (13)$$

式中: $0 \leq L_{ci} \leq 1$, L_{ci} 越大说明机构的速度灵敏度越高,即机构传递精度越好。当 $L_{ci}=1$ 时,矩阵 \mathbf{J} 有相同的奇异值,此时机构失真度为 0,传递性能最好;而当 $L_{ci}=0$ 时,则称该机构处于奇异位形,失真度为无穷大。

根据式(13)及表 1 中的几何参数,利用 MATLAB 搜索出机构在 $z=200$ mm 处的灵巧度三维图,如图 4 所示。可见,当 $\alpha = -25^\circ, \beta = 0^\circ$,灵巧度最大,达到 0.32。

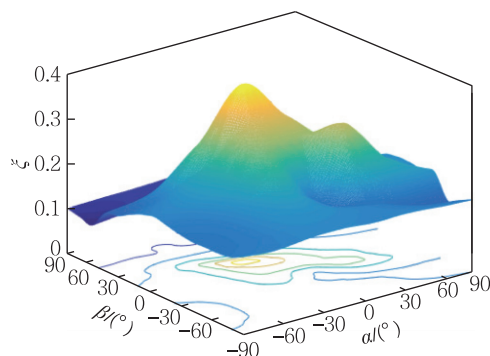


图 4 在截面 $z=200$ mm 处的灵巧度

3.3 设计参数对运动性能的影响

由于该机构各结构参数之间存在较强的耦合关系,难以定量分析各个参数对机构运动性能的影响。因此,文中保持各尺寸参数不变,改变其中某一参数,从而得出该参数的变化范围及其对机构运动性能的影响。

当其他参数保持不变,改变动平台半径 r_a ,机构动平台转角和 γ ($\gamma = \alpha + \beta$) 的变化曲线如图 5(a) 所示。可见,当动平台半径 r_a 在区间 $[50, 180]$ mm 时,动平台转角之和 γ 大于 120° ,可以满足样机转动

要求。机构灵巧度 ξ 的变化曲线如图 5(b) 所示。可见,当动平台半径 r_a 在区间 $[50, 200]$ mm 时,灵巧度值较大,动平台运动性能较优秀。综上所述,可得动平台半径 r_a 在区间 $[50, 180]$ mm 内,机构运动性能最佳。

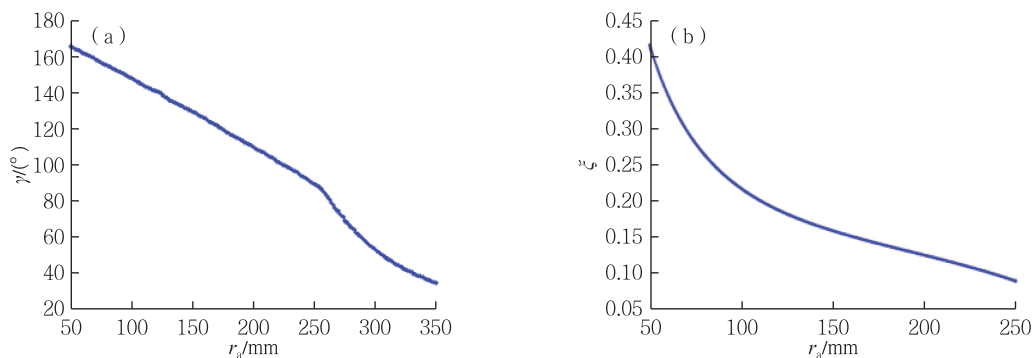


图 5 动平台尺寸 r_a 的变化对转角与灵巧度的影响

当其他参数保持不变,改变动杆长 l_i ,机构动平台转角和 γ ($\gamma = \alpha + \beta$) 的变化曲线如图 6(a) 所示,可见,当杆长 l_i 大于 280 mm 时,动平台转角之和 γ 大于 120° ,可以满足样机转动要求。机构灵巧度 ξ 的变化曲线如图 6(b) 所示。可见,当动平台半径 r_a 在区间 $[200, 350]$ mm 时,灵巧度值较大,动平台运动性能较优秀。综上所述,可得杆长 l_i 区间 $[280, 350]$ mm 内,机构运动性能最佳。

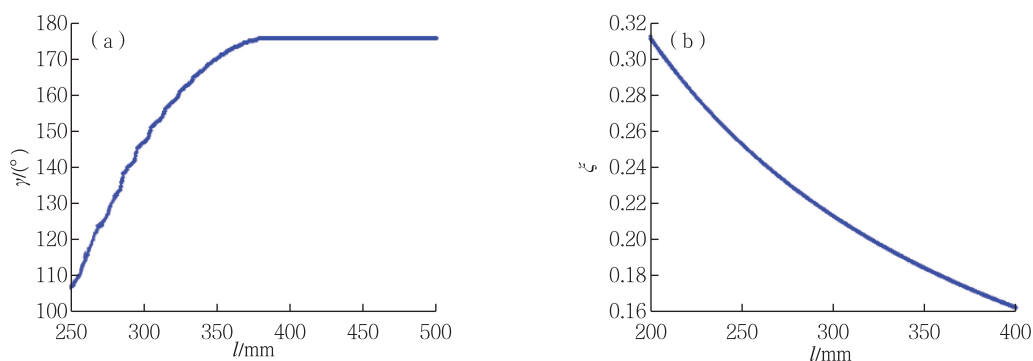


图 6 杆长尺寸 l 的变化对转角与灵巧度的影响

4 优化设计

4.1 建立目标函数

根据上述工作空间、灵巧度的分析可知,定平台的尺寸可根据具体任务要求给定。考虑到总体设计中已确定的固定参数,要得到一个确定的 2PRU-2PUS 并联机构主要有 5 个设计变量,即 r_a, l_1, l_2, l_3 和 l_4 。

要想从全局去评价机构的运动性能必须建立全局性能评价指标,即利用全域条件数作为衡量机构运动性能的工具,全局条件数表示机构在给定工作空间内的总体运动性能,全局条件数是机构灵巧度的度量。用 H 表示机构的全域条件数,它的范围是 $(0, 1]$,如果 H 的值等于 1,表示该机构的运动传递性能就达到了最佳状态,如果 H 的趋于 0,表示该机构处于奇异状态。由于通常很难得到关于全局条件数 H 的解析解,所以全局条件数 H 可以使用离散型来表示,即

$$H = \frac{\sum (1/C)}{\tau} \quad (14)$$

式中: $\sum (1/C)$ 为工作空间网格内每一个局部条件数的倒数之和; τ 为落在该工作空间网格里面的点数量。

因此可选用离散全域条件数作为机构优化目标,即

$$G(X) = \min(-H) \quad (15)$$

为了保证在有限空间内并联机构设计方案的可行性并便于优化计算,需要给出 2PUS-2RUR 并联机构各设计变量的变化范围。为了计算简单,3.3 节已对各参数的取值做了初步限定,因此对该机构参数变量进行处理,给出尺寸约束范围为

$$\begin{cases} r_{a \min} \leq r_a \leq r_{a \max} \\ l_{\min} \leq l_i \leq l_{\max} \\ |J| \neq 0 \end{cases} \quad (i=1,2,3,4) \quad (16)$$

优化算法的选择取决于数学模型。对前文所建立的 2PRU-2PUS 并联机构的优化模型进行分析,其为一个非线性的约束优化问题,目标函数与约束条件均非常复杂。

4.2 优化算例

本文所选择的优化方法为遗传算法。利用 Matlab 遗传算法工具箱对 2PRU-2PUS 并联机构进行优化计算,其中遗传算法的参数选择直影响优化结果。该机构在优化过程中的主要遗传算法具体参数配置为:种群大小:20,选择方法:随机遍历抽样,重组方式:分散重组,交叉概率:0.6,变异概率:0.01;尺寸约束区间见表 2。

根据上述所得的 2PRU-2PUS 并联机构的优化数学模型与遗传算法,对该机构的尺寸进行优化,进化代数对最优目标函数的影响曲线如图 7 所示。

由结果分析可知,该机构全局条件数的数值较优化前提高了 10% 左右,提高较明显,表示 2PRU-2PUS 并联机构的整体运动性能有所提升。由于机构在现实样机制作时,需要考虑其成本与加工精度,所以将所得的优化设计参数进行圆整处理,优化前后及圆整后的参数见表 3。

表 2 设计参数的上下边界 mm

参数	最小值	最大值
r_a	50	180
l_1	280	350
l_2	280	350
l_3	280	350
l_4	280	350

表 3 遗传算法优化结果

优化阶段	r_a/mm	l_1/mm	l_2/mm	l_3/mm	l_4/mm	H
优化前	70	280	280	280	280	0.221 5
优化后	50.60	334.65	346.85	304.30	344.68	0.241 7
圆整后	50	334	346	304	344	0.241 2

由优化后的设计参数,可得该机构的工作空间如图 8 所示,图中,机构在角 α 方向上的工作空间明显增大,增加 20° 左右,角 β 方向明显变大 20° 左右, z 轴方向工作空间明显大于优化前的工作空间,增加 50 mm。

图 9 表示优化后机构在 $z=200$ mm 的灵巧度,通过比较优化前后灵巧度发生明显变化,优化前数值较小,表明在此界面上的运动性能较差,优化后的灵巧度在 α , β 各个方向上明显变大。优化所得的机构参数为后期设计并联式太阳追踪装置提供了理论参考依据。

5 运动仿真

根据太阳的运动轨迹,东西方向理论转动的角度为 180° ,而有效光照角度范围在 130° 左右,要求 α 范围在 $[-65^{\circ}, 65^{\circ}]$ 之间;冬天和夏天,太阳的运动轨迹在南、北方向也存在差异,二者之间角度范围大致在 40° 内,要求 β 范围在 $[6^{\circ}, 35^{\circ}]$ 之间。

根据上述优化后的运动参数,建立三维模型,并通过 Proe 运动仿真,模拟太阳的运动轨迹,得到一天内装置的太阳追踪姿态图及机构的转角。

如图 10(a)~10(d)所示,分别为装置在 8:00, 10:00, 12:00, 15:00 所需要的运动状态,表 4 为机构在这 4 个时刻的转角与输入参数。

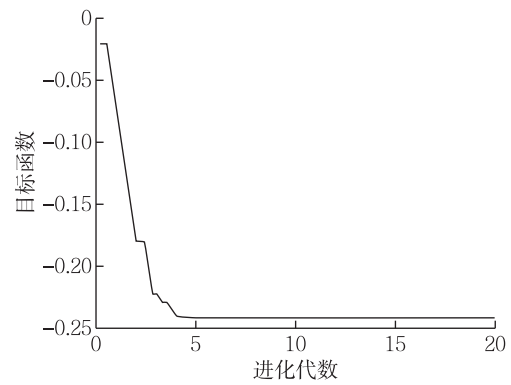


图 7 最佳目标函数随代数变化曲线

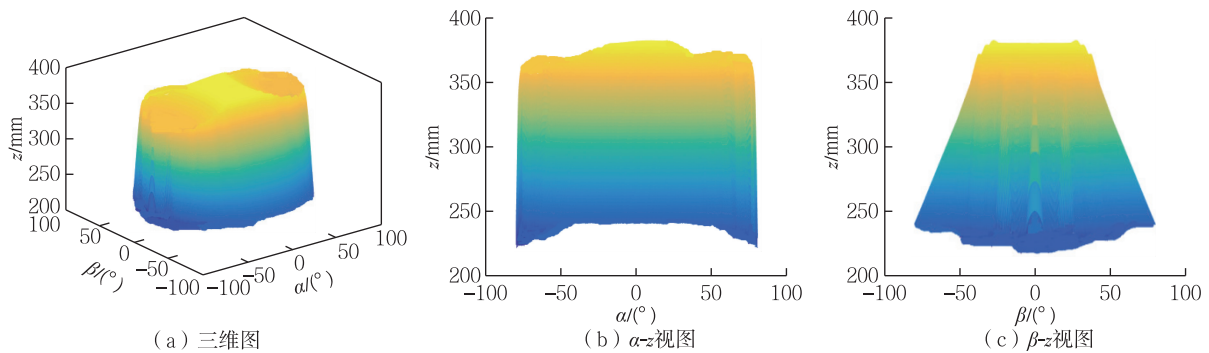


图 8 工作空间图形

表 4 机构不同时刻的转角与输入参数

参数	不同时刻			
	8:00	10:00	12:00	15:00
$\alpha/(^{\circ})$	43.77	18.78	0.64	-45.76
$\beta/(^{\circ})$	6.33	21.09	35.60	10.94
P_{11}/mm	(235.61,0)	(440.44,0)	(469.03,0)	(283.04,0)
P_{21}/mm	(0,451.26)	(0,457.58)	(0,254.01)	(0,192.98)
P_{31}/mm	(-260.03,0)	(-322.55,0)	(-309.86,0)	(-170.92,0)
P_{41}/mm	(0,-252.83)	(0,-157.06)	(0,-409.12)	(0,-449.18)

若动平台在 x 轴或者 y 轴上存在微小的移动自由度,可以让平台绕该轴线转动的转角增大,该装置在不同时刻绕 x 轴和 y 轴两个方向转动的转角 α, β 的变化曲线如图 11 所示。

6 结 论

对 2PUS-2RU 并联机构进行了运动学分析,求得了该机构的位置反解、速度雅克比矩阵,并分析了其工作空间和灵巧度等;及设计参数对运动

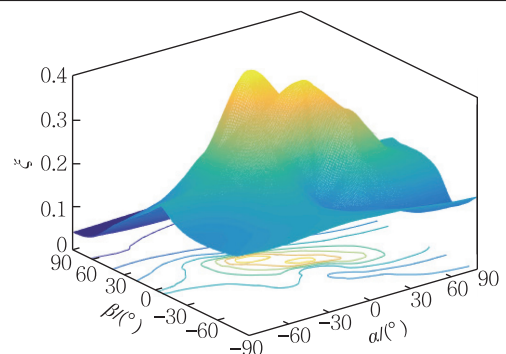


图 9 在截面 $z=200\text{ mm}$ 处灵巧度

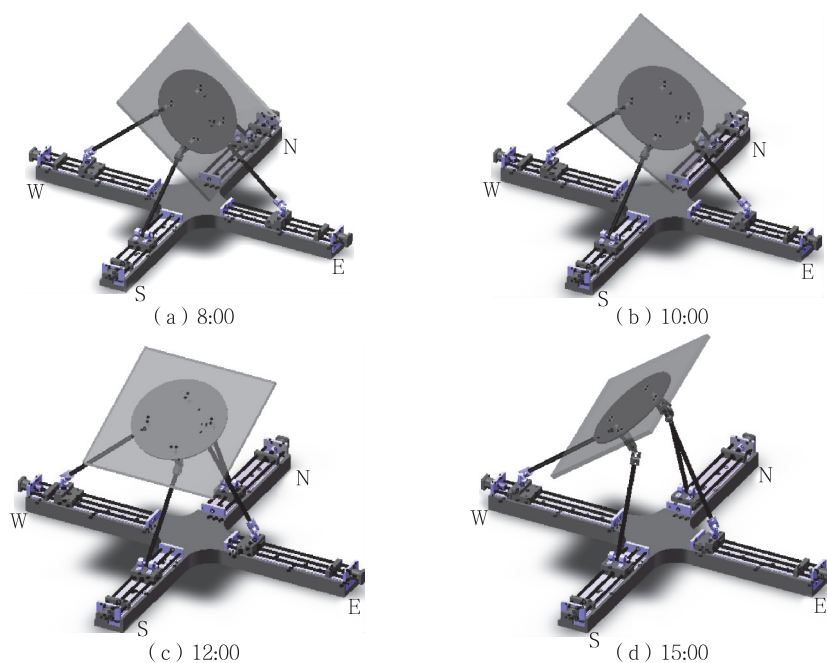


图 10 太阳追踪姿态图

性能的影响;以工作空间和灵巧度为优化目标,采用遗传算法进行了多目标综合优化,机构参数进行综合优化后,全局条件数提高了近 10%,其运动平稳性有所提高;优化后的工作空间在各方向上均明显增大,机构的综合性能显著提高。

参考文献:

- [1]罗海玉,张淑珍.一种新型并联太阳能跟踪机构研究[J].机械设计,2015,32(10):82-85.
- [2]张震,沈惠平,尹洪贺,等.一种新型 3T1R 并联机构的设计及其运动学分析[J].常州大学学报(自然科学版),2017,29(5):57-67.
- [3]CHIN C,BAHU A,MCBRIDE W.Design modeling and testing of a standalone single axis active solar tracker using matlab/simulink[J]. Renew Energy,2011,36:3075-3090.
- [4]ALEXANDRU C, POZNA C.Different tracking strategies for optimizing the energetic efficiency of a photovoltaic system[C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Automation. Cluj-Napoca: IEEE,2008: 22-25.
- [5]COMSIT M,VISA I.Design of the linkages type tracking mechanisms of the solar energy conversion systems by using multi body systems method[C]// Proceedings of twelfth world IEEE in mechanism and machine science. Paris: IEEE,2007:63-66.
- [6]PALOMAR-CAMICERO J,CASANOVA-PELEZ P,DAZ-GARRIDO F,et al. Nuevo sistema de seguimiento solar de dos ejes basado en el mecanismo de biela-manivela[J]. Dyna,2009,84:671-680.
- [7]曲云霞.二自由度解耦球面并联机构运动学行为研究[D].天津:河北工业大学,2008.

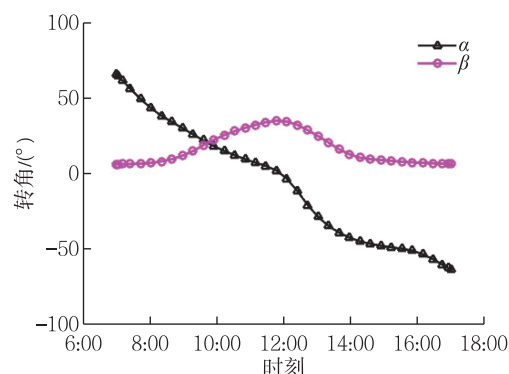


图 11 装置转角变化

4 结 论

传统计算方法得到的合力大小和方向与本文提出的精确计算结果的最大值接近,未能真正反映实际情况,使得零部件的设计强度过于富裕,将造成材料的浪费。本文考虑全齿廓曲线及动态液压场计算方式得出的液压力的大小和方向在齿轮泵工作的过程中呈周期性不断变化,能够得到符合客观实际情况的零部件设计,节省材料、降低齿轮泵制造成本。

参考文献:

- [1]铁占续,刘志超.流体机械原理设计及应用[M].北京:中国电力出版社,2009.
- [2]WANG J, LUO S M, CHEN L F, et al. Analysis of transmission characteristics of cosine gear drive[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 21(3): 94-98.
- [3]黄鹏.渐开线内啮合齿轮泵内齿圈壁受液压力的计算[J].液压气动与密封,2016,36(3):46-49.
- [4]岳桂勋.复杂齿面的通用五轴数控机床加工技术研究[D].郑州:郑州大学,2012.
- [5]冀宏,赵光明.基于流场的外啮合齿轮泵径向力计算[J].液压与气动,2013,41(7):1-4.
- [6]钱志达,祝海林,蒋宇,等.内啮合齿轮泵的排量计算[J].常州大学学报(自然科学版),2013,25(1):43-45.
- [7]宋伟,周华,金涛.内啮合齿轮泵压力腔包络角图形化求解研究[J].液压与气动,2014(12):8-13.
- [8]刘巍,王安麟,单学文,等.齿轮泵主从动齿轮腔压力分布的非对称性分析[J].东北大学学报(自然科学版),2015,36(9):1327-1330.
- [9]刘迎圆.基于 CFD 的高压内啮合齿轮泵三维数值计算方法及其不平衡径向力的研究[D].杭州:浙江大学,2016.
- [10]朱玉丽,喻长发.基于 CFD 的齿轮泵流场解析[J].机床与液压,2016,44(5):171-174.

(责任编辑:李艳)

【上接第 49 页】

- [8]CARRICATO M, PARENTI-CASTELLI V. A novel fully decoupled two-degrees-of-freedom parallel wrist[J]. Int J Robot Res,2004, 23:661-667.
- [9]曾宪菁,黄田,曾子平. 3-RRR 型数控回转台的精度分析[J]. 机械工程学报,2001,37(11):42-45.
- [10]GOSSELIN C M, LAVOIE E. On the kinematic design of spherical 3-DOF parallel manipulators[J]. Int J Robot Res, 2008,12(4): 394-402.
- [11]KAROUIA M, HERVE A J M. 3-DOF tripod for generating spherical rotation [J]. Academic Publishers, 2000, 12(20): 395-402.
- [12]GOSSELIN C, ANGELES J. The optimum kinematic design of a spherical three-degree-of-freedom parallel manipulator[J]. ASME J Mech Transm Automat Des, 1989, 111: 202-207.
- [13]孙立宁,刘宇,祝宇虹.一种用于腕关节的球面三自由度并联解耦机构位置分析[J].中国机械工程,2003,14(10): 831-833.
- [14]黄田,曾宪菁,曾子亚.顶锥角 3 自由度球面并联机构的全参数解析尺度综合[J].机械工程学报,2000,36(8):15-19.
- [15]张顺心,宋开峰,范顺成.基于并联球面机构的太阳跟踪装置研究[J].河北工业大学学报,2003,32(6):44-48.
- [16]宋开峰.新型太阳跟踪装置机构的研究[D].天津:河北工业大学,2004.
- [17]ROLLAND L. Kinematics synthesis of 2 dof parallel manipulators for solar tracking[C]// International workshop on robotics. Danube: ESA, 2012:44-48.

(责任编辑:李艳)