

月壤采样试验验证机构运动性能研究

郭宗环¹ 谢志江¹ 郑燕红² 齐凯¹ 袁岳军¹ 吴小勇¹

(1. 重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 中国空间技术研究院, 北京 100094)

摘要: 为开展月壤采样试验, 设计了一种可以实现姿态调整的3自由度并联机构, 根据机构运动特点, 采用修正的K-G(Kutzbach-Grübler)公式计算机构的自由度, 利用封闭矢量法求解该机构位置逆解, 并建立机构速度、加速度和可操作度性能评价指标。提出一种基于速度性能与可操作度性能为目标, 采用多目标遗传算法优化机构结构参数, 对优化后的结构参数进行分析, 得到该机构工作空间、速度性能、奇异性和可操作度性能。研究表明: 动平台姿态 α 、 β 在 $-0.35 \sim 0.35$ rad时, 机构速度性能最好; 可操作度性能指标均在 $[4, 5]$ 区间范围内, 不会产生奇异位形, 有较好的可操作性能, 验证该机构能够满足月壤采样试验功能要求, 对开展月壤采样试验验证具有一定的实用价值。

关键词: 采样试验; 并联机构; 运动性能; 封闭矢量法; 多目标遗传算法

中图分类号: TP18; TH113.2⁺2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2016)08-0406-07

Kinematic Performance of Mechanism for Lunar Soil Sampling Test

Guo Zonghuan¹ Xie Zhijiang¹ Zheng Yanhong² Qi Kai¹ Yuan Yuejun¹ Wu Xiaoyong¹

(1. State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, China

2. China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: In order to launch the lunar soil sampling test, a novel parallel mechanism of three degrees of freedom was designed and analyzed for the position and orientation adjustment. According to characteristics in movement of the mechanism, the freedom degree of mechanism was calculated by the modified K-G (Kutzbach-Grübler) formula after the analysis and calculation, the mechanism has a total of 3 degrees of freedom with 2 rotation and vertical movement, and the inverse solution of the kinematics problem was solved by adopting the closed vector method. The evaluation indexes of performance in velocity, acceleration and dexterity of the mechanism were established. A multi-objective genetic algorithm was proposed to optimize the structural parameters of the mechanism based on the performance of velocity and dexterity. The working space and singularity as well as performance in velocity and dexterity of the mechanism could be obtained after analyzing the optimized structural parameters. Results showed that the performance in velocity was excellent under the condition that α and β of the moving platform were moved in the range of $-0.35 \sim 0.35$ rad and the maximum value of the velocity performance index of the sampling test mechanism will appear in this range. The results also showed that the singularity would not appear when the performance indexes in dexterity were in the range of $[4, 5]$ and the mechanism had good movement performance and the operation velocity of the attitude of the moving platform in the characteristic direction and be satisfied. All the analysis results proved that the mechanism can meet the requirements of lunar soil sampling test and it had certain reference value for development of lunar soil sampling test.

Key words: sampling test; parallel mechanism; movement performance; closed vector method; multi-objective genetic algorithm

收稿日期: 2016-05-09 修回日期: 2016-06-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1530138)

作者简介: 郭宗环(1988—),男,博士生,主要从事机械设计和串并联机器人研究, E-mail: zonghuan208@163.com

通信作者: 谢志江(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事机械设计、机电一体化及设备故障诊断研究, E-mail: xie@cqu.edu.cn

引言

月壤采样试验是指在实验室内部真实模拟月面复杂环境下钻采、表采试验数据^[1-2]。

根据采样试验技术要求,应满足月面坡度为水平两个角度方向 α, β 在 $-0.174 \sim 0.174 \text{ rad}$ 、竖直方向行程在 $-200 \sim 250 \text{ mm}$ 环境下得到采样数据,同时要求姿态调整过程中机构稳定。为此,需在采样试验场地内部搭建一套试验装置用于模拟采样姿态,并在不同姿态下完成采样试验。为顺利开展采样试验工作,需对采样试验机构进行运动性能分析以满足试验要求。

并联机构运动性能分析是并联机构能够得到实际运用的基础。机构的运动学性能主要包括机构速度、加速度、可操作度、奇异性等^[3]。为评判采样试验机构的运动性能,需建立该机构速度、加速度、可操作性能评价指标,依据 3 项性能指标对机构的运动学性能进行分析评价。

与串联机构相比,并联机构具有承载能力大、刚度大、运动精度高等优点,受到国内外众多研究者的广泛研究,并在工业工程领域获得广泛应用^[4-18]。

在运动学性能求解过程中,需选取一组最优的结构参数进行分析。并联机构尺寸参数优化的方法有很多, MARCO 等^[19]以工作区体积和机器人尺寸为目标函数对结构进行优化设计;金国光等^[20]通过分析承载力和刚度性能评价指标对给定工作空间下的机构进行尺寸优化设计,综合得到机构最佳设计尺寸;张良安等^[21]提出一种采用改进混沌粒子群算法对 Ahut-Delta 并联机构进行优化,得到在全域运动性能最佳的尺度参数;文献[22]也提出了一种串行与并行结合的优化设计方法。

本文提出一种月壤采样封装试验验证机构,计算机构的自由度,得到运动学逆解雅可比矩阵,建立速度、加速度、可操作度性能指标模型;提出一种以速度性能与可操作度性能为优化目标,采用多目标遗传算法优化机构结构参数,对优化后的结构参数进行运动学性能分析,得到该机构工作空间、速度性能、奇异性及可操作性能。

1 机构模型描述及自由度分析

1.1 机构模型描述

月壤采样试验过程中需要对采样姿态进行调整,即采样试验验证机构应完成水平面两个方向的角度调整和竖直高度方向的动作调整。

图 1 为采样试验验证机构,机构的动平台安装钻筒、表取臂等,动平台的姿态通过 3 个电动缸的伸

缩来调整。中间约束链为采样试验姿态调整提供高的刚度,增加姿态调整稳定性。

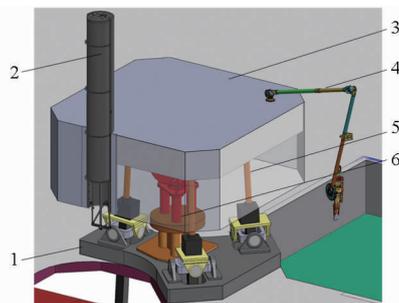


图 1 月壤采样试验验证机构

Fig. 1 Test verification mechanism for lunar soil sampling

1. 基座 2. 钻筒 3. 动平台 4. 表取臂 5. 电动缸 6. 约束链

1.2 机构自由度分析

该机构类似于 Stewart 平台,属于闭环机构。计算自由度时需考虑过约束和局部自由度情况,可采用修正的 K-G (Kutzbach-Grübler) 公式

$$M = d(n - g - 1) + \sum_{i=1}^g f_i + v - \zeta \quad (1)$$

式中 M ——机构自由度 n ——机架构件数目
 d ——机构阶数
 g ——机构中运动副数
 f_i ——第 i 个运动副的自由度数
 v ——多环并联机构在去除公共约束因素后的冗余约束数目
 ζ ——机构中存在局部自由度的数目

图 2 所示为采样试验验证机构简图,定平台通过 3 个 UPS 支链以及 1 个约束分支 PU 与动平台连接,定平台 3 个虎克铰中心点 U_1, U_2, U_3 与动平台 3 个球铰中心点 S_1, S_2, S_3 均为等边三角形的顶点。取点 O 为三角形 $\Delta U_1 U_2 U_3$ 角的中心;取点 O_1 为三角形 $\Delta S_1 S_2 S_3$ 的中心;取动平台与定平台的半径分别为 r_a, r_b , 则 $\angle U_1 O U_2 = \angle U_1 O U_3 = \angle S_1 O_1 S_2 = \angle S_1 O_1 S_3 = 120^\circ$ 。

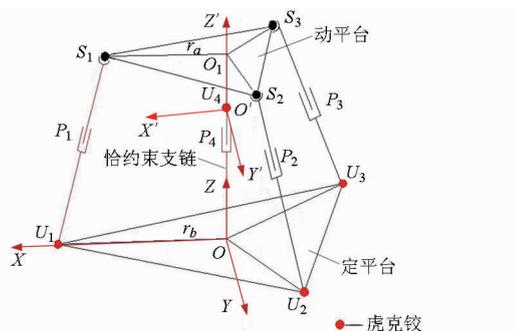


图 2 机构简图

Fig. 2 Schematic diagram of mechanism

针对该机构有: $d=6, n=9, g=11, v=0, \zeta=0$, 则

$$M = 6(9 - 11 - 1) + 21 - 0 = 3$$

2 机构运动学分析

2.1 机构运动学逆解

求解并联机构运动逆解时需要已知输入动平台的位姿参数,进而求解得到各个驱动杆长;虽然采用数值迭代法求解运动学逆解具有通用性,但通常计算量大,且不能保证求解的完整性和收敛性,在此,该机构采用一种运动学封闭矢量解法^[23]来求逆解。

动平台绕定坐标系 X 轴、 Y 轴、 Z 轴的旋转角分别为 α 、 β 、 γ ,则动坐标系相对于参考坐标系的旋转矩阵 R 为

$$R = R_z(\gamma)R_y(\beta)R_x(\alpha) =$$

$$\begin{bmatrix} c\gamma c\beta & c\gamma s\beta s\alpha - s\gamma c\alpha & c\alpha s\beta c\gamma + s\alpha s\gamma \\ s\gamma c\beta & s\alpha s\beta s\gamma + c\alpha c\gamma & s\gamma s\beta c\alpha - c\gamma s\alpha \\ -s\beta & c\beta s\alpha & c\beta c\alpha \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中 $c\alpha = \cos\alpha$; $s\alpha = \sin\alpha$; $c\beta = \cos\beta$, $s\beta = \sin\beta$; $c\gamma = \cos\gamma$; $s\gamma = \sin\gamma$ 。

考虑该机构动平台相对于定平台绕 Z 轴没有旋转,故 $\gamma = 0$,代入式(2)中,可得

$$R = \begin{bmatrix} c\beta & s\beta s\alpha & c\alpha s\beta \\ 0 & c\alpha & -s\alpha \\ -s\beta & c\beta s\alpha & c\beta c\alpha \end{bmatrix} \quad (3)$$

该机构封闭矢量图如图3所示,设 a_i 为定平台虎克铰中心在定坐标系 $OXYZ$ 中的单位矢量; b_i 为动平台球铰中心在动坐标系 $O_1X'Y'Z'$ 中的单位矢量; u_i 为驱动方向单位矢量; p 为动坐标系原点在定坐标系中的矢量, $p = (0, 0, h)$; l_i 定义为第 i 根驱动杆杆长; a_i 、 b_i 、 u_i 、 p 构成并联机构封闭矢量。

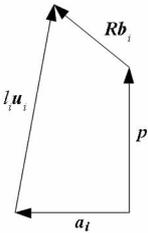


图3 封闭矢量图

Fig. 3 Closed vector diagram

建立封闭矢量方程

$$l_i u_i = R b_i - a_i + p \quad (4)$$

则该机构的逆解模型

$$l_i = \sqrt{(R b_i - a_i + p)^T (R b_i - a_i + p)} \quad (5)$$

根据已知结构参数条件代入式(5)得到3条驱动支链的位置逆解表达式

$$l_1 = (r_a \cos\beta - r_b)^2 + (-r_a \sin\beta + h)^2 \quad (6)$$

$$l_2 = \left(-\frac{1}{2}r_a \cos\beta + \frac{\sqrt{3}}{3}r_a \sin\beta \sin\alpha + \frac{1}{2}r_b \right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2}r_a \cos\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}r_b \right)^2 + \left(\frac{1}{2}r_a \sin\beta + \frac{\sqrt{3}}{2}r_a \sin\alpha \cos\beta + h \right)^2 \quad (7)$$

$$l_3 = \left(-\frac{1}{2}r_a \cos\beta - \frac{\sqrt{3}}{2}r_a \sin\alpha \sin\beta + \frac{1}{2}r_b \right)^2 + \left(-\frac{1}{2}r_a \cos\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}r_b \right)^2 + \left(\frac{1}{2}r_a \sin\beta - \frac{\sqrt{3}}{2}r_a \sin\alpha \cos\beta + h \right)^2 \quad (8)$$

2.2 雅可比矩阵及速度加速度求解

求解并联机构的雅可比矩阵一般使用微分变换法或者矢量积法^[24]。针对该采样试验验证机构提出一种基于符号运算的微分变换法,该微分变换法能更加快速和简捷地获得机构的雅可比矩阵,求出一阶影响系数矩阵,并采用一阶运动影响系数对该机构速度雅可比矩阵快速求解。

驱动杆长可以表示为

$$l_i = \sqrt{(R b_i - a_i + p)^T (R b_i - a_i + p)} = f_i(\alpha, \beta, h) \quad (9)$$

两侧对时间求导

$$\dot{l}_i = \frac{\partial f_i(\alpha, \beta, h)}{\partial \alpha} \dot{\alpha} + \frac{\partial f_i(\alpha, \beta, h)}{\partial \beta} \dot{\beta} + \frac{\partial f_i(\alpha, \beta, h)}{\partial h} \dot{h} \quad (10)$$

即得到该机构的速度逆解的数学模型

$$\begin{bmatrix} \dot{l}_1 \\ \dot{l}_2 \\ \dot{l}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1(\alpha, \beta, h)}{\partial \alpha} & \frac{\partial f_1(\alpha, \beta, h)}{\partial \beta} & \frac{\partial f_1(\alpha, \beta, h)}{\partial h} \\ \frac{\partial f_2(\alpha, \beta, h)}{\partial \alpha} & \frac{\partial f_2(\alpha, \beta, h)}{\partial \beta} & \frac{\partial f_2(\alpha, \beta, h)}{\partial h} \\ \frac{\partial f_3(\alpha, \beta, h)}{\partial \alpha} & \frac{\partial f_3(\alpha, \beta, h)}{\partial \beta} & \frac{\partial f_3(\alpha, \beta, h)}{\partial h} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ \dot{h} \end{bmatrix} \quad (11)$$

令 $\dot{f} = [\dot{l}_1 \quad \dot{l}_2 \quad \dot{l}_3]^T$, $v = [\dot{\alpha} \quad \dot{\beta} \quad \dot{h}]^T$, 有

$$\dot{f} = Jv \quad (12)$$

式中 \dot{f} ——驱动支链运动速度

v ——末端执行器空间运动速度

J 即为雅可比矩阵。

由式(10)可得

$$v = G\dot{f} \quad (13)$$

其中

$$G = J^{-1}$$

假设采样试验过程中机构驱动支链输入与末端输出产生微小的扰动量分别为 $\delta\dot{f}$ 和 δv , 则

$$\frac{\|\delta v\|}{\|v\|} \leq \|G\| \|G^{-1}\| \leq \frac{\|\delta f\|}{\|f\|} \quad (14)$$

式中 $\|G\| \|G^{-1}\|$ ——矩阵 G 的条件数

令 $K_c = \|G\| \|G^{-1}\|$, 由于 $1 \leq K_c \leq \infty$, 所以取 $1/K_c$ 作为度量该机构速度性能的指标。

式(13)两侧对时间求二阶偏导可得

$$\ddot{v} = G\ddot{f} + \dot{G}\dot{f} \quad (15)$$

化简得 $a = \ddot{v} = G\ddot{f} + \dot{f}^T H \dot{f}$ (16)

式中 a ——动平台输出加速度

H ——机构二阶影响系数矩阵

令 $v_1 = G\dot{f}, v_2 = \dot{f}^T H \dot{f}$, 则

$$\delta v_1 = G\delta\dot{f} \quad (17)$$

$$\delta v_2 = \dot{f}^T H \delta\dot{f} + \delta\dot{f}^T \dot{f} - H\dot{f} + \delta\dot{f}^T H \delta\dot{f} \quad (18)$$

即 $\frac{\|\delta \dot{v}_1\|}{\|\dot{v}_1\|} \leq \|G\| \|G^{-1}\| \leq \frac{\|\delta \dot{f}\|}{\|\dot{f}\|}$ (19)

由于 $\dot{f}\dot{f}^T \neq 0$, 设 $\dot{f}\dot{f}^T = r$, 则

$$v_2 \dot{f}^T = \dot{f}^T H r \quad (20)$$

得 $\dot{f}^T = \frac{\dot{v}_2 \dot{f}^T H^{-1}}{r}$ (21)

$$\frac{\|\delta \dot{v}_2\|}{\|\dot{v}_2\|} \leq \frac{\|H\| \|H^{-1}\|}{r} (2\|\dot{f}\| \|\delta\dot{f}\| + \|\dot{f}\|^2) \quad (22)$$

应用 Frobenius 范数, $r = \|\dot{f}\|^2$ 代入式(22)可得

$$\frac{\|\delta \dot{v}_2\|}{\|\dot{v}_2\|} \leq \|H\| \|H^{-1}\| \left(2 \frac{\|\delta\dot{f}\|}{\|\dot{f}\|} + \frac{\|\delta\dot{f}\|^2}{\|\dot{f}\|^2} \right) \quad (23)$$

相应地得到加速度相对偏差为

$$\frac{\|\delta a\|}{\|a\|} \leq \|G\| \|G^{-1}\| \frac{\|\delta\dot{f}\|}{\|\dot{f}\|} + \|H\| \|H^{-1}\| \left(2 \frac{\|\delta\dot{f}\|}{\|\dot{f}\|} + \frac{\|\delta\dot{f}\|^2}{\|\dot{f}\|^2} \right) \quad (24)$$

式(24)得到加速度的相对偏差与 $\|G\| \|G^{-1}\|$ 、 $\|H\| \|H^{-1}\|$ 相关。其中令 $K_H = \|H\| \|H^{-1}\|$, K_H 为加速度影响系数矩阵 H 的条件数。

2.3 可操作度性能指标建立

对于既有转动又有移动的并联机构来说, 可以采用可操作度来对机构运动学性能指标进行评价^[25-26]。即

$$\omega = \sqrt{JJ^{-1}} \quad (25)$$

式中 ω ——可操作度

利用 J 的奇异值, 式(25)也可以写成

$$\omega = \sigma_1 \sigma_2 \cdots \sigma_m \quad (26)$$

根据可操作度 ω 评判机构位形, 即:

(1) $\omega = 0$, 机构处于奇异位形。

(2) $\omega = \infty$, 机构处于不定形状态, 此时机构可以看成为一个刚体。

(3) $0 < \omega < \infty$, 机构能够完成所需要的工作, 其数值反映机构偏离奇异位形和不定形状态的程度。

3 多目标优化及运动学性能分析

3.1 多目标优化结构参数

以采样试验机构的速度性能和可操作度性能为优化目标, 采用多目标遗传算法进行结构参数优化, 综合最优的一组结构参数得到机构可达工作空间, 分析速度、加速度、可操作度性能。

根据该机构自身运动特点, 得知机构的动平台半径 r_a 、定平台半径 r_b 与机构的初始高度 h_0 结构参数对速度性能和可操作度性能造成影响, 将 r_a 、 r_b 、 h_0 3 个结构参数作为结构优化的设计变量。结合设计变量与优化目标建立多目标优化模型为

$$\begin{cases} \max f_1(x) = v(r_a, r_b, h_0) \\ \max f_2(x) = \omega(r_a, r_b, h_0) \\ \text{s. t. } 200 \text{ mm} \leq r_a \leq 500 \text{ mm} \\ \quad \quad 300 \text{ mm} \leq r_b \leq 600 \text{ mm} \\ \quad \quad 1\,000 \text{ mm} \leq h_0 \leq 1\,300 \text{ mm} \end{cases} \quad (27)$$

其中

$$x = (r_a, r_b, h_0)$$

多目标遗传算法求解流程如图 4 所示。

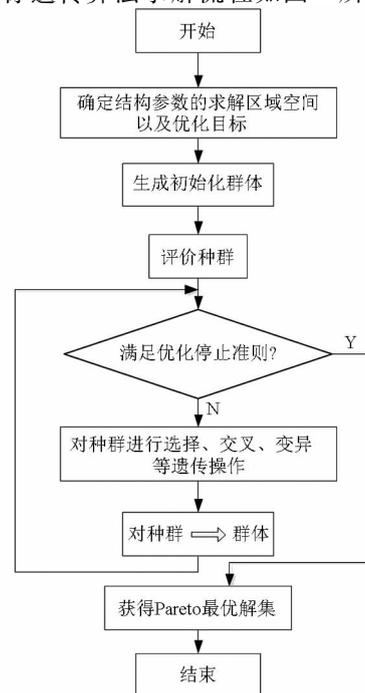


图 4 多目标遗传算法求解流程图

Fig. 4 Flowchart of multi-objective genetic algorithm for solving process

在 Matlab 优化工具箱中给定设计变量数目及约束条件,确定遗传算法的相关参数,设置完成后进行优化计算,得到速度性能和可操作性能的 Pareto 前沿,如图 5 所示。

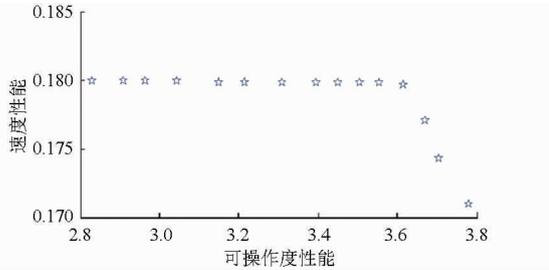


图 5 速度性能与可操作度性能的 Pareto 前沿

Fig. 5 Pareto front of velocity performance and manipulability

优化求解后得到 Pareto 最优解与设计变量的值如表 1 所示。

表 1 5 个典型 Pareto 解和设计变量

Tab. 1 Five typical Pareto solution and design variables

动平台半径 r_a/mm	定平台半径 r_b/mm	初始高度 h_0/mm	速度性能 指标	可操作度 性能指标
400	600	1 211	0.180	3.025
400	470	1 290	0.174	3.743
400	600	1 235	0.180	3.238
400	600	1 266	0.180	3.482
400	482	1 287	0.174	3.713

按照要求选取最优参数,选择采样试验机构结构参数为:动平台半径 $r_a=400\text{ mm}$ 、定平台半径 $r_b=600\text{ mm}$ 和初始高度 $h_0=1\ 235\text{ mm}$ 。根据最优参数研究采样试验机构的工作空间、速度性能、可操作度性能以及奇异性,最终评判采样试验机构的运动学性能。

3.2 工作空间分析

根据采样试验机构约束条件,考虑杆长约束以及球铰转角约束,给定驱动支链杆长范围为 $800\sim 1\ 800\text{ mm}$,球铰转角范围为 $-1.05\sim 1.05\text{ rad}$ 。对机构的工作空间求解如图 6 所示。图 6 所示为采样试验机构的可达工作空间,工作空间在 XOY 、 YOZ 、 XOZ 参考坐标系的投影如图 7 所示。

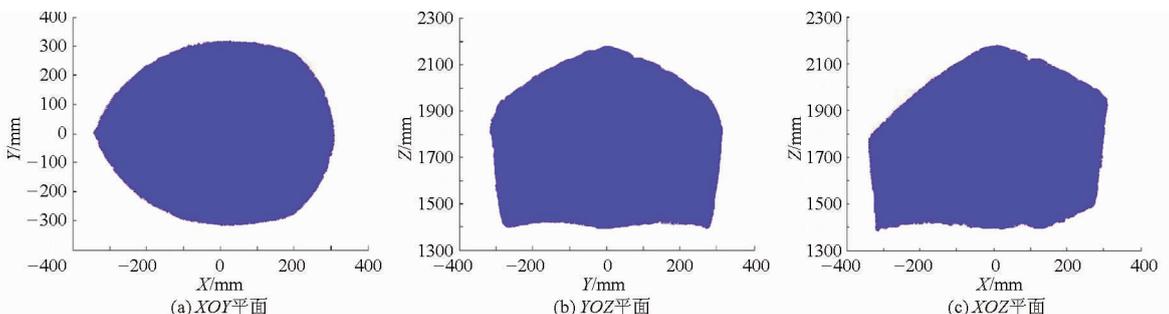


图 7 工作空间平面投影图

Fig. 7 Projection of working space in reference frame

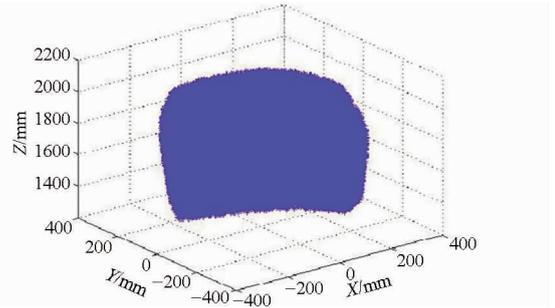


图 6 采样试验机构工作空间

Fig. 6 Working space of sampling test mechanism

经分析,得到采样试验机构工作空间在 X 方向可达 $-350\sim 320\text{ mm}$,在 Y 方向可达 $-320\sim 320\text{ mm}$,在 Z 方向可达 $1\ 380\sim 2\ 190\text{ mm}$,满足实际月壤采样试验空间的要求。

3.3 速度性能分析

根据已建立的速度性能评价指标模型,在其可达工作空间内对采样试验机构的速度性能分析,由优化后的结构参数数据,分析动平台位姿参数在 $-0.5\text{ rad}\leq\alpha\leq 0.5\text{ rad}$, $-0.5\text{ rad}\leq\beta\leq 0.5\text{ rad}$ 范围内变化时速度性能的变化情况如图 8 所示。

由图 8 分析得,动平台转角 α 、 β 处在 $-0.358\sim 0.358\text{ rad}$ 区域范围内采样试验机构的速度性能指标出现最大值,机构在这个区域的速度性能最好。在 -0.5 rad 和 0.5 rad 极限角度区域机构运动速度性能较差,试验时机构应避免在该区域工作。

3.4 可操作度性能分析

根据建立的可操作度性能评价指标,对采样专项试验验证机构进行可操作度性能评价,分析动平台的位姿参数在 $-0.5\text{ rad}\leq\alpha\leq 0.5\text{ rad}$, $-0.5\text{ rad}\leq\beta\leq 0.5\text{ rad}$ 范围内变化时可操作度性能的变化情况,如图 9 及表 2 所示。

由表 2 分析得到,该机构在其工作空间范围内,速度性能指标在 $0.25\sim 0.3$ 之间,机构速度性能较好。可操作度性能指标均处在 $[4,5]$ 区间内,不会出现奇异位形和不定姿态情况,且驱动关节速度平稳、可靠,可满足动平台姿态在特征方向上的操作速度要求,验证其具有良好的运动学性能。

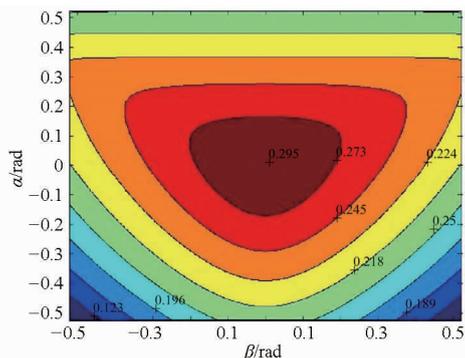


图 8 采样试验机构速度性能

Fig. 8 Velocity performance of sampling test mechanism

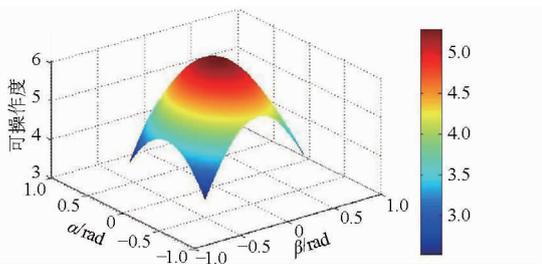


图 9 采样试验机构可操作度性能

Fig. 9 Manipulability of sampling test mechanism

4 结论

(1) 利用修正的 K-G 公式求得机构的自由度, 分析得出机构有 2 个转动和 1 个移动 3 个自由度, 满足月壤采样试验技术要求。

表 2 速度性能与可操作度性能指标
Tab. 2 Values of velocity performance and manipulability

姿态角	数值/rad	速度性能指标	可操作度性能指标
α	-0.174	0.254	4.0 ~ 4.5
	0	0.295	4.5 ~ 5.0
	0.174	0.256	4.0 ~ 4.5
β	-0.174	0.256	4.0 ~ 4.5
	0	0.295	4.5 ~ 5.0
	0.174	0.256	4.0 ~ 4.5

(2) 依据机构封闭矢量图推导出该机构的运动学逆解, 并得到机构雅可比矩阵, 为后续分析机构运动性能指标奠定了基础。

(3) 提出以速度性能和可操作性能为优化目标, 采用多目标遗传算法对机构结构参数进行优化, 得到最优结构参数, 为月壤采样试验机构结构设计提供了理论参考。

(4) 依据最优结构参数对机构运动学性能研究, 得到机构的最大工作空间, 研究结果表明该机构的动平台姿态 α, β 在 $-0.35 \sim 0.35$ rad 区域范围内机构运动速度性能较好, 该区域内进行月壤采样试验性能最优。

(5) 分析机构可操作度性能, 得到可操作度性能指标在 $[4, 5]$ 区间内, 机构不会出现奇异, 验证该机构具备良好的运动学性能, 能够满足采样试验的技术要求。

参 考 文 献

- 1 钟坦. 中国探月工程前景广阔[J]. 国际太空, 2007(12): 1-7.
- 2 欧阳自远. 我国月球探测的总体科学目标与发展战略[J]. 地球科学进展, 2004, 19(3): 352-358.
OUYANG Ziyuan. Scientific objectives of Chinese lunar exploration project and development strategy [J]. Advance in Earth Sciences, 2004, 19(3): 352-358. (in Chinese)
- 3 BEELEY P R. Cast steels for tools and dies; a review[J]. The British Foundryman, 1986, 24(11): 441-445.
- 4 DASGUPTA B, MRUTHYUNJYA T S. The Stewart platform manipulator[J]. Mechanism and Machine Theory, 2000, 35(1): 15-40.
- 5 LI Yangmin, XU Qingsong. A new approach to the architecture optimization of a general 3-PUU translational parallel manipulator [J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2006, 46(1): 59-72.
- 6 STEWART D. A platform with six degrees of freedom[J]. Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers, 1965, 180(5): 371-386.
- 7 MASOULEH M T, GOSSELIN C, SAASATZI M H, et al. Kinematic analysis of 5-RPUR (3T2R) parallel mechanisms[J]. Meccanica, 2011, 46(1): 131-146.
- 8 黄真, 赵永生, 赵铁石. 高等空间机构学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- 9 DAI J S, HUANG Z, LIPKIN H. Mobility of overconstrained parallel mechanisms[J]. ASME Journal of Mechanical Design, 2006, 128(1): 220-229.
- 10 陈修龙, 陈林林, 梁小夏. 4 自由度冗余驱动并联机构运动学和工作空间分析[J]. 农业机械学报, 2014, 45(8): 307-313.
CHEN Xiulong, CHEN Linlin, LIANG Xiaoxia. Kinematics and workspace analysis of a novel 4-DOF redundant actuation parallel mechanism [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 307-313. (in Chinese)
- 11 高秀兰, 鲁开讲, 王娟平. Delta 并联机构工作空间解析及尺度综合[J]. 农业机械学报, 2008, 39(5): 146-149.
GAO Xiulan, LU Kaijiang, WANG Juanping. Workspace resolution and dimensional synthesis on Delta parallel mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(5): 146-149. (in Chinese)
- 12 崔国华, 张艳伟, 张英爽, 等. 空间转动型 3-SPS/S 并联机器人的构型设计分析[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2009, 39(增刊 1): 200-205.

- CUI Guohua, ZHANG Yanwei, ZHANG Yingshuang, et al. Configuration design and analysis of a new 3-SPS/S spatial rotation parallel manipulator[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2009, 39(Supp. 1): 200-205. (in Chinese)
- 13 齐明, 刘海涛, 梅江平等. 3-PUS/PU 3 自由度并联机构运动学优化设计[J]. 天津大学学报, 2007, 40(6): 649-654.
 QI Ming, LIU Haitao, MEI Jiangping, et al. Kinematics optimum design of a 3-DOF parallel mechanism with 3-PUS/PU architecture[J]. Journal of Tianjin University, 2007, 40(6): 649-654. (in Chinese)
- 14 季晔, 刘宏昭, 原大宁. 4-SPS/PPU 型并联机构工作空间与尺度分析[J]. 农业机械学报, 2013, 44(11): 322-328.
 JI Ye, LIU Hongzhao, YUAN Daning. Workspace and scale analysis of 4-SPS/PPU parallel mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(11): 322-328. (in Chinese)
- 15 沈惠平, 杨廷力, 马履中. 一类新型六自由度并联机构及其结构分析[J]. 中国机械工程, 2008, 19(6): 721-724.
 SHEN Huiping, YANG Tingli, MA Lüzhong. A class of 6-DOF parallel kinematic structures and structure analysis[J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(6): 721-724. (in Chinese)
- 16 刘玉斌, 赵杰, 蔡鹤皋. 新型 6-PRRS 并联机器人运动学和动力学研究[J]. 吉林大学学报:工学版, 2008, 38(5): 1220-1224.
 LIU Yubin, ZHAO Jie, CAI Hegao. Study on kinematics and dynamics of a novel 6-PRRS parallel robot[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2008, 38(5): 1220-1224. (in Chinese)
- 17 崔国华, 张海强, 徐丰, 等. 空间 3-PUS-UP 并联机构运动灵巧性与刚度性能研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(12): 348-354.
 CUI Guohua, ZHANG Haiqiang, XU Feng, et al. Kinematic dexterity and stiffness performance of spatial 3-PUS-UP parallel manipulator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(12): 348-354. (in Chinese)
- 18 杨继东, 杨中山, 刘栋, 等. H 形并联机构运动学分析与样机精插补控制实验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(11): 324-329.
 YANG Jidong, YANG Zhongshan, LIU Dong, et al. Kinematic analysis and experiment of H-shaped parallel mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(11): 324-329. (in Chinese)
- 19 MARCO C, CECCARELLI M, LANNI C. A multi-objective optimum design of general 3R manipulators for prescribed workspace limits[J]. Mechanism and Machine Theory, 2004, 39(2): 119-132.
- 20 金国光, 王艳, 宋轶民, 等. 基于给定工作空间的球面变胞仿生关节机构优化设计[J]. 农业机械学报, 2013, 44(12): 288-293, 320.
 JIN Guoguang, WANG Yan, SONG Yimin, et al. Optimum design of spherical metamorphic mechanism used for bionic joint based on prescribed workspace[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(12): 288-293, 320. (in Chinese)
- 21 张良安, 万俊, 谭玉良. Ahut-Delta 并联机构改进混沌粒子群算法尺度综合[J]. 农业机械学报, 2015, 46(8): 344-351.
 ZHANG Liang'an, WAN Jun, TAN Yuliang. Dimensional synthesis of Ahut-Delta parallel mechanism based on improved chaotic particle swarm algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(8): 344-351. (in Chinese)
- 22 TSAI L W. Robot analysis: the mechanics of serial and parallel manipulators[M]. New York: Wiley-Interscience Publication, 1999.
- 23 赵杰, 王卫忠, 蔡鹤皋. 可重构机器人封闭形式的运动学逆解计算[J]. 机械工程学报, 2006, 42(8): 211-214.
 ZHAO Jie, WANG Weizhong, CAI Hegao. Generation of closed-form inverse kinematics for reconfigurable robots[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(8): 211-214. (in Chinese)
- 24 黄真, 孔令富, 方跃法. 并联机器人机构学理论及控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- 25 于靖军, 刘辛军, 丁希仑, 等. 机器人机构学的数学基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- 26 LIU X J, WANG J. A new methodology for optimal kinematic design of parallel mechanisms[J]. Mechanism and Machine Theory, 2007, 42(9): 1210-1224.

(上接第 345 页)

- 16 MARY Baker. Analysis method to support design for damping [J]. Engineering with Computer, 2007, 23(1): 1-10.
- 17 QUERIN O M, STEVEN G P, XIE Y M. Evolutionary structural optimization using bi-directional algorithm [J]. Engineering Computations, 1998, 15(8): 1031-1048.
- 18 李以农, 谢熔炉, 王宜, 等. 约束阻尼结构拓扑优化设计的进化算法[J]. 重庆大学学报, 2010, 33(8): 1-6.
 LI Yinong, XIE Ronglu, WANG Yi, et al. Topology optimization for constrained layer damping material in structures using ESO method[J]. Journal of Chongqing University, 2010, 33(8): 1-6. (in Chinese)
- 19 廖宇兰, 刘世豪, 孙佑攀, 等. 基于灵敏度分析的木薯收获机机架结构优化设计[J]. 农业机械学报, 2013, 44(12): 56-61.
 LIAO Yulan, LIU Shihao, SUN Youpan, et al. Structural optimization for rack of cassava harvester based on sensitivity analysis [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(12): 56-61. (in Chinese)
- 20 SIGMUND O, PETERSSON J. Numerical instabilities in topology optimization: a survey on procedures dealing with checkerboard, mesh dependencies, local minima[J]. Structural & Multidisciplinary Optimization, 1998, 16(1): 68-75.