

计及安装角的六自由度平台虎克铰 干涉计算模型

刘洋, 江涛

(湖南师范大学工程与设计学院, 长沙 410081)

摘要:为了拓展六自由度平台的可达空间,提出了计及安装角参数的虎克铰干涉计算方法。根据虎克铰与相邻结构之间的位姿关系,对上、下铰座分别建立了计及安装角的虎克铰转角计算模型。采用仿真法求解了斜棱柱虎克铰的转角范围,拟合了描述虎克铰工作空间的非参数模型,建立了斜棱柱虎克铰干涉判定条件。通过分析动平台平动轨迹,探讨了铰座运动与安装角之间的变化规律。将虎克铰的干涉计算与六自由度平台的运动学反解结合,通过动平台在极限位置的运动试验,验证了虎克铰干涉计算模型在拓展六自由度平台极限位姿中的有效性。

关键词:机械设计及理论;六自由度平台;铰座约束;避障;工作空间

中图分类号:TP242 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2024)06-1519-09

DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20230112

Interference calculation model of Hooke joint of 6-DOF platform considering installation angle

LIU Yang, JIANG Tao

(College of Engineering and Design, Hunan Normal University, Changsha 410081, China)

Abstract: To expand the reachable space of the 6-DOF platform, an interference calculation method of Hooke joint considering the installation angle parameters was proposed. According to the position and attitude relationship between Hooke joint and adjacent structures, the calculation models of Hooke joint angle including installation angle were established for upper and lower joint seats respectively. The rotation angle range of the oblique prism Hooke joint was solved by simulation method, the nonparametric model describing the workspace of Hooke joint was fitted, and the judgment conditions for interference of the oblique prism Hooke joint were established. By analyzing the translation track of the moving platform, the variation law between the joint movement and the installation angle was discussed. Combining the interference calculation of the Hooke joint with the inverse kinematics solution of the 6-DOF platform, the interference calculation model of the Hooke joint in extending the limit position and posture of the 6-DOF platform was verified through the motion test of the moving platform at the limit position.

Key words: mechanical design and theory; 6-DOF platform; joint constraint; obstacle avoidance; workspace

收稿日期:2023-02-07.

基金项目:建设机械关键技术国家重点实验室开放基金项目(SKLCM2022-02).

作者简介:刘洋(1981-),男,副教授,博士.研究方向:机器人系统设计和起重机动力学分析.

E-mail:liuyang@hunnu.edu.cn.

0 引言

六自由度平台是由 6 个驱动支链连接动平台和定平台的闭链机构,具有结构刚度大、运动精度高、承载能力大等优点^[1]。目前,六自由度平台已被应用于波浪补偿^[2]、飞行模拟^[3]、驾驶模拟^[4]、自动装配^[5]等场合。然而,工作空间小^[6]、轨迹规划复杂^[7]仍是限制六自由度平台推广应用的重要瓶颈。

虎克铰具有两个轴线正交的转动自由度,是六自由度平台的重要部件。影响虎克铰工作空间的因素包括绕 X 轴转动的 α 角范围,绕 Y 轴转动的 β 角范围,虎克铰的安装角以及 α 角的初始值。Mahmood 等^[8]以支链长度和铰链转角为约束条件,程颖等^[9]以铰链运动空间、支链行程及支链之间的运动为约束条件,Pernkopf 等^[10]以转角极限和奇异点为约束条件,研究了六自由度平台的工作空间,但均未考虑虎克铰的安装角对六自由度平台的影响。陈晓光等^[11]采用坐标变换方法研究了 Hexaglide 并联机构的工作空间,发现虎克铰的安装角对并联机构工作空间有明显影响,但未总结出安装角与工作空间之间的规律。于晖等^[12]以虎克铰两个转角为变量搜索了虎克铰的工作空间,并以 β 角最小为优化条件得到了一组虎克铰安装角,但未研究虎克铰安装角与六自由度平台运动性能之间的变化趋势,对于虎克铰在六自由度平台中的设计缺乏全面指导。

根据描述虎克铰转角范围,建立虎克铰干涉判定准则是研究六自由度平台避障的重要内容。求解虎克铰转角范围的方法有解析法和仿真法两种。陈晓光等^[11]采用解析法求解了直棱柱虎克铰的转角范围,提出了计算虎克铰转角及判定直棱柱虎克铰干涉的算法流程;Kong 等^[13]研究了虎克铰转角与结构尺寸之间的关系,采用虎克铰两个转角同时达到摆角最大值作为虎克铰干涉的判定条件;孙立宁^[14]仿真求解了直棱柱虎克铰的转角范围,研究了直棱柱虎克铰的干涉判定准则,但这些干涉判定条件受虎克铰结构形式影响,与其他虎克铰不通用。

本文以受力情况较好的斜棱柱虎克铰为对象,通过分析六自由度平台中斜棱柱虎克铰与相邻结构之间的位姿关系,建立了包含安装角参数的虎克铰转角的计算方法;通过仿真研究了虎克铰安装角对六自由度平台运动性能的影响;将铰

座干涉计算与运动学反解相结合,通过试验验证了六自由度平台在极限位姿的运动能力。

1 虎克铰坐标系定义

斜棱柱虎克铰的支座侧壁为斜面,相对于直棱柱虎克铰,其抗弯刚度好、运动范围大,是使用广泛的虎克铰,其结构图如图 1 所示。

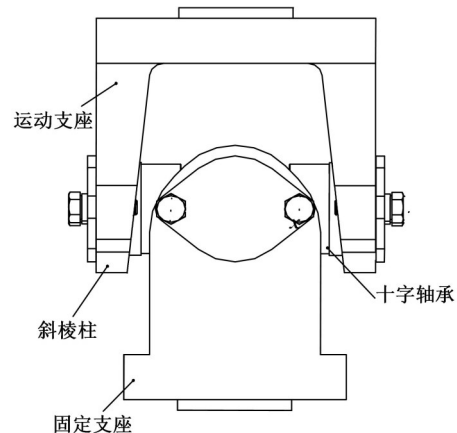


图 1 斜棱柱虎克铰结构图

Fig. 1 Structural diagram of Hooke joint of oblique prism

图 1 中,斜棱柱虎克铰包括运动支座、固定支座和十字轴承 3 个部件,其中,固定支座与定平台或动平台相连,运动支座与电动缸相连,十字轴承通过两个正交转动轴与运动支座和固定支座相连。

根据图 1 所示虎克铰,建立六自由度平台模型。取 6 个上铰座的铰点中心 $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6$,取 6 个下铰座的铰点中心 $B_1, B_2, B_3, B_4, B_5, B_6$,在上铰点中心所在外接圆的圆心 O 建立动平台坐标系 $\{O\}$: $O-X_oY_oZ_o$,在下铰点中心所在外接圆的圆心 S 建立定平台坐标系 $\{S\}$: $S-X_sY_sZ_s$,如图 2 所示。

6 个上铰点在动平台坐标系 $\{O\}$ 的坐标写成齐次坐标的形式为:

$$A = [a_{ij}]_{4 \times 6} = \begin{bmatrix} [a_{ij}]_{3 \times 6} \\ [1]_{1 \times 6} \end{bmatrix}_{4 \times 6} \quad (1)$$

式中:第 j 列向量 $a_j (j=1, 2, \dots, 6)$ 为上铰点 A_j 在动坐标系 $\{O\}$ 中的坐标。

6 个下铰点在定平台坐标系 $\{S\}$ 的坐标写成齐次坐标的形式为:

$$B = [b_{ij}]_{4 \times 6} = \begin{bmatrix} [b_{ij}]_{3 \times 6} \\ [1]_{1 \times 6} \end{bmatrix}_{4 \times 6} \quad (2)$$

式中:第 j 列向量 $b_j (j=1, 2, \dots, 6)$ 为下铰点 B_j

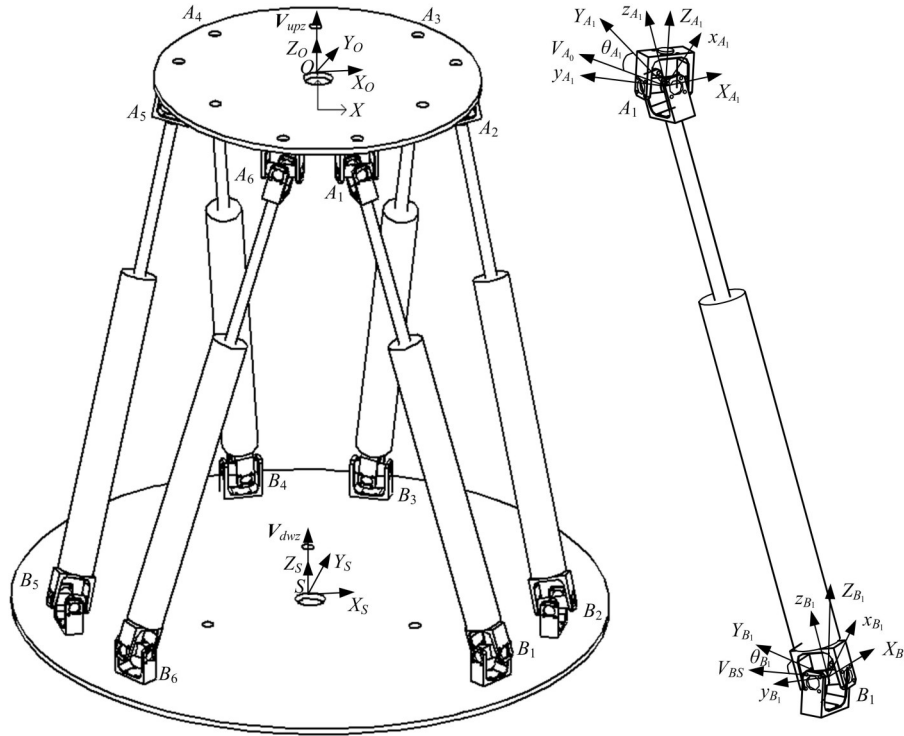


图 2 六自由度平台坐标系及铰座坐标系

Fig. 2 Coordinate system of Stewart platform and joint

在定坐标系中的坐标。

取下铰座 B_1 进行研究。为了描述虎克铰与动平台和定平台的位置关系,在虎克铰 B_1 上建立描述铰座相对运动的固定坐标系 $B_1-X_{B_1}Y_{B_1}Z_{B_1}$ 和运动坐标系 $B_1-x_{B_1}y_{B_1}z_{B_1}$ 。铰座中心为坐标系原点,十字轴与固定支座的转轴为 X_{B_1} ,固定支座竖直向上方向为 Z_{B_1} ,即 V_{dwz} ,十字轴与运动支座的转轴为 y_{B_1} ,电动缸轴线方向为 z_{B_1} 。下铰座 B_1 中心到铰点圆心 S 连线的单位向量为 V_{BS} , V_{BS} 与 Y_{B_1} 之间的夹角 θ_{B_1} 为下铰座的安装角,则有:

$$V_{BS} = (P_S - P_{B_1}) / |P_S - P_{B_1}| \quad (3)$$

式中: P_S, P_{B_1} 分别为定平台铰点圆心 S 和下铰座 B_1 中心的位置坐标。

根据 Rodrigues 旋转公式,结合铰座安装角 θ_{B_1} 和定平台 Z 向矢量 V_{dwz} ,有:

$$Y_{B_1} = \cos(\theta_{B_1})V_{BS} + (1 - \cos\theta_{B_1})(V_{BS} \cdot V_{dwz})V_{dwz} + \sin(\theta_{B_1})(V_{dwz} \times V_{BS}) \quad (4)$$

下铰座 B_1 的 X_{B_1} 轴为 Y_{B_1} 与 Z_{B_1} 轴的叉乘,其数学描述为:

$$X_{B_1} = Y_{B_1} \times Z_{B_1} \quad (5)$$

定义下铰座的 z_{B_1} 轴为电动缸的伸长方向,有:

$$z_{B_1} = (P_{A_1} - P_{B_1}) / |P_{A_1} - P_{B_1}| \quad (6)$$

式中: P_{A_1} 为上铰座 A_1 中心的位置坐标

下铰座 B_1 的 y_{B_1} 轴为下铰座的 z_{B_1} 轴与 X_{B_1} 轴的叉乘,其数学描述为:

$$y_{B_1} = z_{B_1} \times X_{B_1} \quad (7)$$

与下铰座 B_1 类似,上铰座 A_1 的坐标系可以定义如下。

上铰座 A_1 的中心到动平台铰点圆心 O 连线的单位向量为 V_{AO} ,其数学描述为:

$$V_{AO} = (P_O - P_{A_1}) / |P_O - P_{A_1}| \quad (8)$$

式中: P_O 为动平台铰点圆心 O 的位置坐标。

上铰座 A_1 固定坐标系的 Y_{A_1} 为方向固定不动的单位向量, V_{A_0} 与 Y_{A_1} 之间的夹角 θ_{A_1} 为上铰座 A_1 的安装角,结合动平台 Z 向矢量 V_{upz} ,可得:

$$Y_{A_1} = \cos(\theta_{A_1})V_{A_0} + (1 - \cos\theta_{A_1})(V_{A_0} \cdot V_{upz})V_{upz} + \sin(\theta_{A_1})(V_{upz} \times V_{A_0}) \quad (9)$$

上铰座 A_1 的 X_{A_1} 轴为 Y_{A_1} 与 Z_{A_1} 轴叉乘的方向,其数学描述为:

$$X_{A_1} = Y_{A_1} \times Z_{A_1} \quad (10)$$

上铰座 A_1 的 z_{A_1} 轴为电动缸的伸长方向,有:

$$z_{A_1} = (P_{A_1} - P_{B_1}) / |P_{A_1} - P_{B_1}| \quad (11)$$

上铰座 A_1 的 y_{A_1} 轴为上铰座 A_1 的 z_{A_1} 轴与 X_{A_1}

轴的叉乘,其数学描述为:

$$y_{A_1} = z_{A_1} \times X_{A_1} \quad (12)$$

根据上铰点 A_1 的 x_{A_1} 、 y_{A_1} 、 z_{A_1} 和原点坐标,可建立描述上铰点运动坐标系的齐次矩阵 ${}^S A_1 T$;同理,根据下铰点 B_1 的 x_{B_1} 、 y_{B_1} 、 z_{B_1} 以及原点坐标,可建立描述下铰点运动坐标系的齐次矩阵 ${}^S B_1 T$ 。

2 虎克铰干涉判定方法

2.1 下铰座转角计算模型

将定平台固定,使动平台正向运动,动平台运动参数为 $\Delta(\alpha, \beta, \gamma, x, y, z)$ 。动平台相对于定平台中心 S 的位姿矩阵为 ${}^S T$,上铰座 A 的固定坐标系相对于动平台坐标系 $\{O\}$ 的位姿矩阵为 ${}^O A T$,下铰座 B 的固定坐标系相对于定平台坐标系 $\{S\}$ 的位姿矩阵为 ${}^S B T$,上铰座 A 的固定坐标系相对于下铰座 B 的固定坐标系的位姿矩阵 ${}^B A T$ 为:

$${}^B A T = ({}^S B T)^{-1} {}^S T {}^O A T \quad (13)$$

${}^B A T$ 描述了电动缸轴线在下铰座 B 的固定坐标系 $X_{B_1} Y_{B_1} Z_{B_1}$ 的方向向量。

对下铰座 B_1 进行研究,在初始状态,下铰座 B_1 的固定坐标系在定平台坐标系的齐次矩阵为:

$${}^S B_{11} T = \begin{bmatrix} (Y_{B_1} \times V_{dwc})^T & Y_{B_1}^T & V_{dwc}^T & V_{BS}^T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{4 \times 4} \quad (14)$$

在运动终了状态,由式(3)(5)(6)(7)可得下铰座 B_1 的运动坐标系在定平台坐标系的齐次矩阵为:

$${}^S B_{12} T = \begin{bmatrix} (z_{B_1} \times X_{B_1} \times z_{B_1})^T & (z_{B_1} \times X_{B_1})^T & (z_{B_1})^T & V_{BS}^T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{4 \times 4} \quad (15)$$

根据 ${}^S B_{11} T$ 和 ${}^S B_{12} T$,建立铰座 B_1 运动坐标系相对于铰座 B_1 固定坐标系的变换关系为:

$${}^{B_{11}} B_{12} T = ({}^S B_{11} T)^{-1} {}^S B_{12} T \quad (16)$$

设虎克铰的十字轴绕固定支座转动的转角为 α ,运动支座绕十字轴的转角为 β ,如图3所示。

根据欧拉角与两个铰座之间的位姿变换矩阵,可建立虎克铰转角 α 、 β 与 ${}^{B_{11}} B_{12} T$ 之间的关系。

$$\begin{cases} \alpha_{B_1} = \arctan\left(\frac{{}^{B_{11}} B_{12} T(3, 2)}{{}^{B_{11}} B_{12} T(3, 3)}\right) \\ \beta_{B_1} = -\arcsin\left(\frac{{}^{B_{11}} B_{12} T(3, 1)}{{}^{B_{11}} B_{12} T(3, 3)}\right) \end{cases} \quad (17)$$

式中: α_{B_1} 和 β_{B_1} 分别为下铰座 B_1 虎克铰两个转轴的转角。

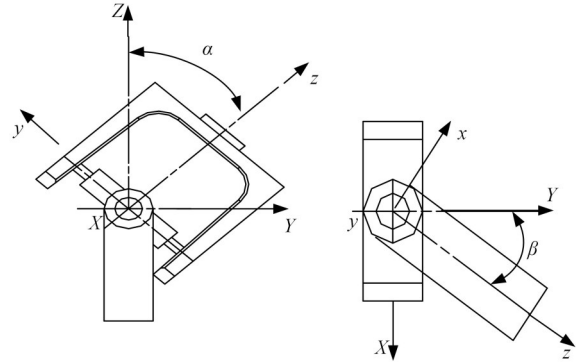


图3 虎克铰的转角定义

Fig. 3 Definition of swing angle of Hooke joint

同理,可建立下铰座 B_2 、 B_3 、 B_4 、 B_5 、 B_6 虎克铰转角与坐标系变换矩阵之间的关系。

2.2 上铰座转角计算模型

假定六自由度平台的当前位姿由定平台相对于动平台反向运动完成,定平台运动参数为 $\Delta(-\alpha, -\beta, -\gamma, -x, -y, -z)$,如图4所示。

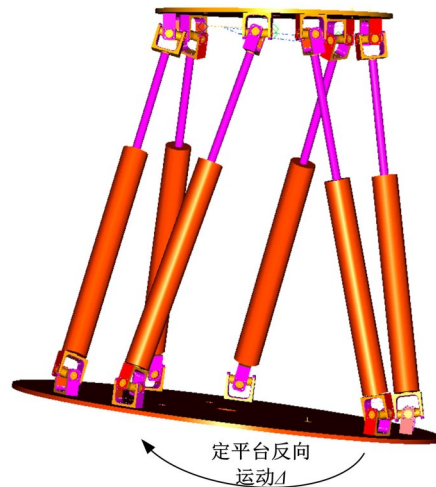


图4 定平台反向运动

Fig. 4 Fixed platform reverse movement

取上铰座 A_1 进行分析,在初始状态,上铰座 A_1 固定坐标系相对于动平台坐标系 $\{O\}$ 的位姿矩阵 ${}^O A_{11} T$;在平台运动终了状态,上铰座 A_1 运动坐标系相对于动平台坐标系 $\{O\}$ 的位姿矩阵 ${}^O A_{12} T$ 。同式(16)可建立铰座 A_1 运动坐标系相对于铰座 A_1 固定坐标系的变换关系为 ${}^{A_{11}} A_{12} T$ 。

同式(17)可求解完成运动 Δ 时,上铰座 A_1 虎克铰的两个转角 α_{A_1} 和 β_{A_1} 。

$$\begin{cases} \alpha_{A_1} = \arctan\left(\frac{{}^{A_{11}} A_{12} T(3, 2)}{{}^{A_{11}} A_{12} T(3, 3)}\right) \\ \beta_{A_1} = -\arcsin\left(\frac{{}^{A_{11}} A_{12} T(3, 1)}{{}^{A_{11}} A_{12} T(3, 3)}\right) \end{cases} \quad (18)$$

同上,可求解上铰座 A_2 、 A_3 、 A_4 、 A_5 、 A_6 虎克铰转角。

2.3 干涉判定规则

在初始状态,上铰座运动坐标系 X 轴和 y

轴的转角分别为 α_{A0} 和 β_{A0} ,下铰座运动坐标系 X 轴和 y 轴的转角分别为 α_{B0} 和 β_{B0} ,虎克铰两轴的极限转角分别为 α_A 、 β_A 和 α_B 、 β_B 。对铰座干涉情况进行分析,如图 5 所示。

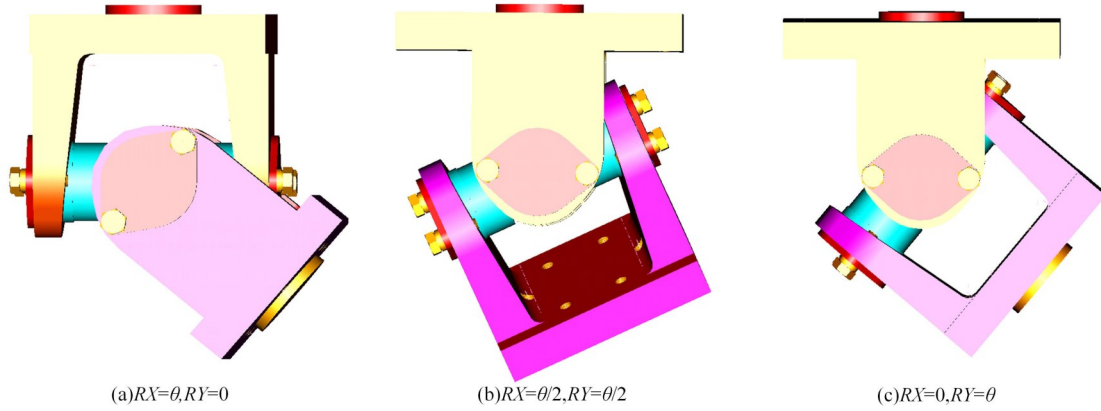


图 5 铰座干涉姿态分析

Fig. 5 Analysis of joint interference pose

由图 5 中铰座 3 个干涉姿态可知,铰座发生干涉的条件为两个支座的内棱交叉或运动支座的外过渡圆与固定支座的底板干涉。根据铰座模型,通过仿真遍历 α 和 β 转角,可得铰座干涉的转角范围。由铰座对称性,现取第一象限的铰座转角范围如图 6 所示。

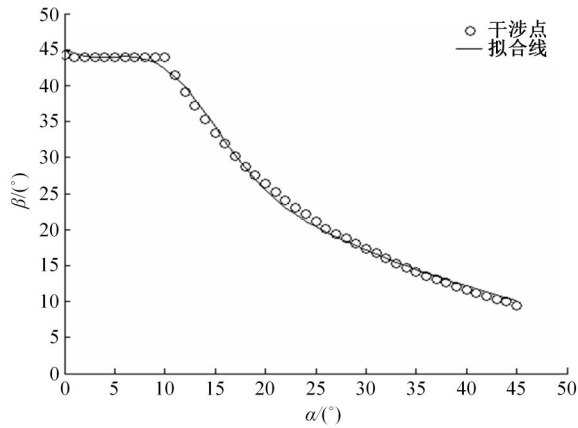


图 6 第一象限铰座转角范围

Fig. 6 Joint angle range within the first quadrant

从图 6 可知,斜棱柱虎克铰的干涉条件为两个转角呈非线性关系,这与直棱柱虎克铰的 α 与 β 之间近似为 45° 直线关系^[11]不同。采用最小二乘法将图 6 中转角 α 和 β 拟合为函数关系:

$$\beta = 391.4e^{-((\alpha + 157)/105.7)^2} + 10.1e^{-((\alpha - 9.961)/7.637)^2} \quad (19)$$

式(19)是描述虎克铰转角关系的非参数模型,其均方根误差为 0.6° 。根据动平台的当前位姿以及下一步的位姿,通过式(17)(18)计算出下

一步铰座的转角 α_A 、 β_A 、 α_B 和 β_B ,并按下式条件判断是否干涉:

$$\begin{cases} \alpha_A \leq \theta & \& \beta_A \leq \theta \\ \alpha_B \leq \theta & \& \beta_B \leq \theta \\ \beta_A \leq 391.4e^{-((\alpha_A + 157)/105.7)^2} + 10.1e^{-((\alpha_A - 9.961)/7.637)^2} \\ \beta_B \leq 391.4e^{-((\alpha_B + 157)/105.7)^2} + 10.1e^{-((\alpha_B - 9.961)/7.637)^2} \end{cases} \quad (20)$$

式(20)确定了虎克铰在工作中不发生干涉的工作空间,即图 6 所示曲线与 X 轴和 Y 轴所围的区域。

3 极限位姿运动仿真及试验

现有一无人机全长为 1.9 m,翼展为 3.7 m,起飞质量为 23 kg,因操控和风速影响,降落时横滚角和俯仰角不超过 8° ,与降落点横向偏距不超过 400 mm。现设计六自由度平台跟踪无人机,研究动平台铰座安装角对铰座约束的影响,探讨六自由度平台在极限位姿对无人机的跟踪能力。六自由度平台参数如下:铰点六边形的长边所对圆心角为 90° ;短边所对圆心角为 30° ;铰点外接圆半径分别为 300、420 mm。六自由度平台仿真模型如图 7 所示。

图 7 中支链最短长度为 784 mm,支链有效行程为 400 mm,额定速度为 250 mm/s。在初始姿态,上铰点圆与下铰点圆之间高度为 950 mm。为探讨不同铰座安装角条件下六自由度平台的运动性能,现取动平台沿动平台坐标

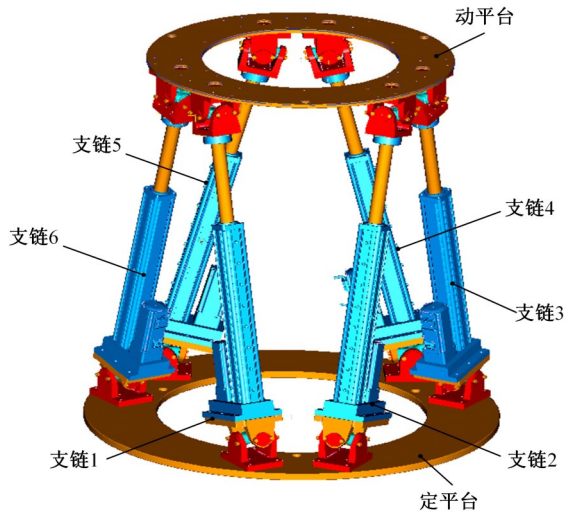


图7 六自由度平台仿真模型

Fig.7 Simulation model of 6-DOF platform

系{O}的X方向运动到极限点为工况1进行研究,其运动方程为:

$$\begin{cases} \alpha(t)=0 \\ \beta(t)=0 \\ \gamma(t)=0 \\ x(t)=400\sin\left(\frac{\pi}{12}t\right) \\ y(t)=0 \\ z(t)=0 \\ t\in[0,6s] \end{cases} \quad (21)$$

对式(18)所示轨迹数据密化后,进行运动学反解,求得实施这一运动轨迹的6条支链运动时域曲线如图8所示。

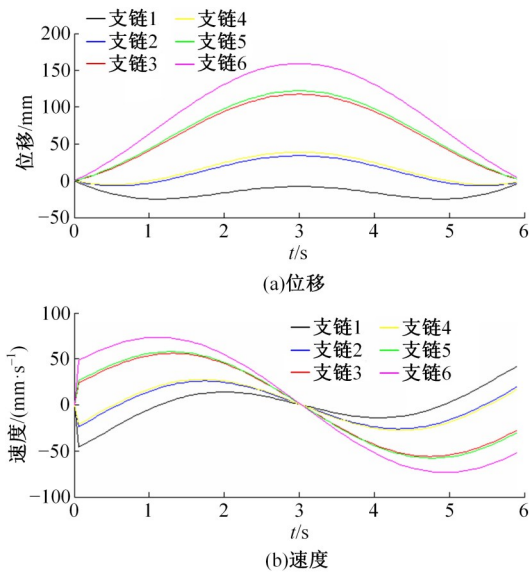


图8 六条支链的运动时域曲线

Fig.8 Time domain curve of motion of six branch chains

图8中,支链正向最大行程为156mm,此时距离上极限为53mm;支链负向最大行程为-24mm,此时距离下极限为167mm。在整个行程范围内,支链最大瞬时速度为74mm/s,小于支链的额定速度,即6条支链均处于有效行程和速度范围内。

取上铰座的安装角 θ_A 和下铰座的安装角 θ_B 的范围为 $0\sim 90^\circ$,完成式(21)这一运动轨迹,虎克铰两个转角随铰座安装角的变化如图9所示。

图9中,当动平台平动时,不同支链铰座转角随安装角变化而变化。将上、下铰座的转角分别求和,发现当上、下铰座安装角为 16° 和 46° 时,铰座转角达到极小值。现取上、下铰座的安装角为 16° 和 46° ,即上、下铰座之间的安装角之差为铰点六边形短边所对圆心角,此时同一支链的两个固定支座在空间保持平行。将式(21)所示运动轨迹代入式(17)(18)中,求得在这一组安装角条件下,上、下铰座虎克铰的转角时域曲线如图10所示,轨迹终点处上铰座虎克铰的转角值及距离转角极限的差值如表1所示。

由图10可知,当同一支链的两个固定支座在空间保持平行且动平台作平动时,同一支链的上、下铰座运动规律一致。由表1可知,第3和第5支链的虎克铰距离干涉点的转角值约 4° ,说明在动平台平动过程中这两个支链运动行程最大。由于装配原因,上、下铰座转角和的初始值为 14° ,虎克铰的运动范围不对称,这使得第3和第5支链的运动范围受限情况更突出。为了避免六自由度平台发生铰座干涉,将式(20)所示的铰座干涉计算作为六自由度平台运动学反解的前置条件,通过验算极限点附近动平台的位姿,判断铰座转角是否超极限值。六自由度平台极限位姿运动试验如图11所示。

图11中,动平台在X向极限点处绕Y轴转动 -2° (工况2),绕Y轴转动 16° (工况3),绕X轴转动 -8° (工况4)。提取工况1~4的12个虎克铰最大转角值,建立虎克铰转角值分布情况如图12所示。3个工况的虎克铰距离干涉点的转角值如表2和表3所示。

从图12可知,4个工况的虎克铰转角均处于虎克铰的转角范围内,在仅发生姿态变化的条件下,下铰座的虎克铰相对于上铰座的运动变化不显著;工况1、2、4均存在上铰座虎克铰接近转角极限的情况,而工况3的上铰座虎克铰的转角则

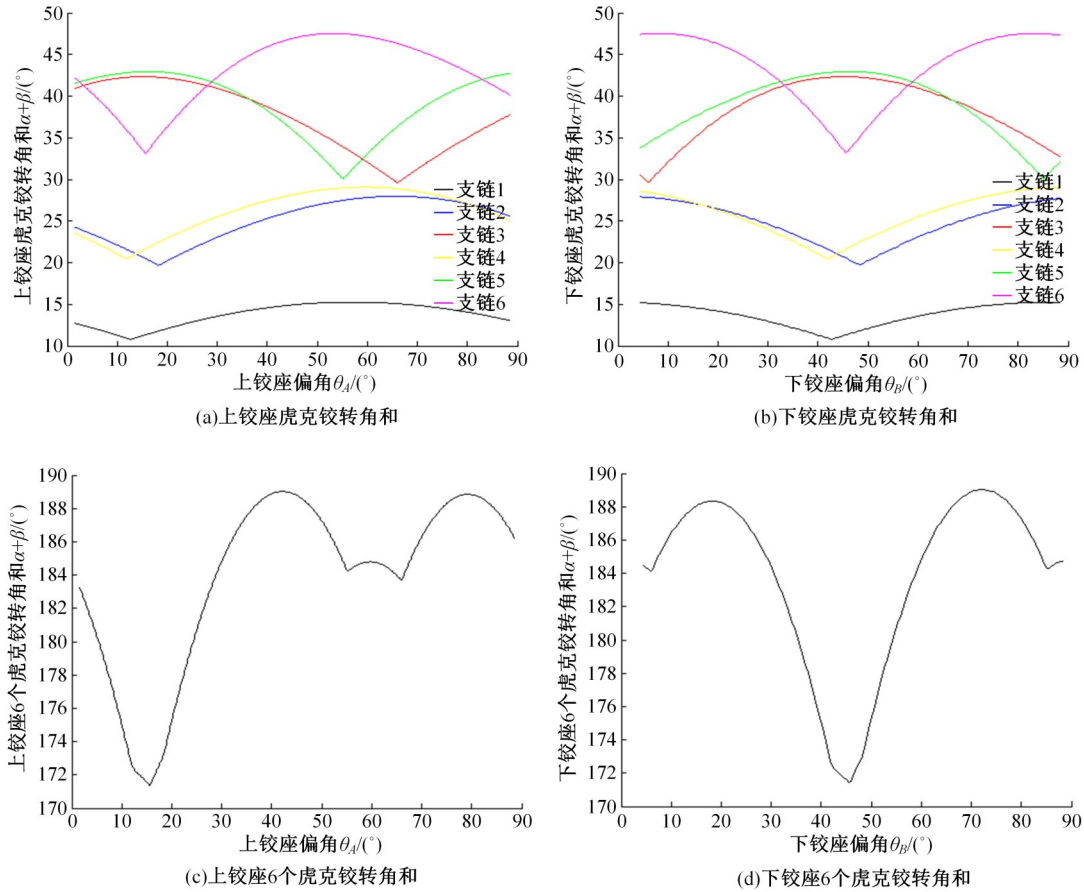


图 9 铰座安装角与虎克铰转角之间的关系

Fig. 9 Relationship between hinge mounting angle and Hooke joint angle

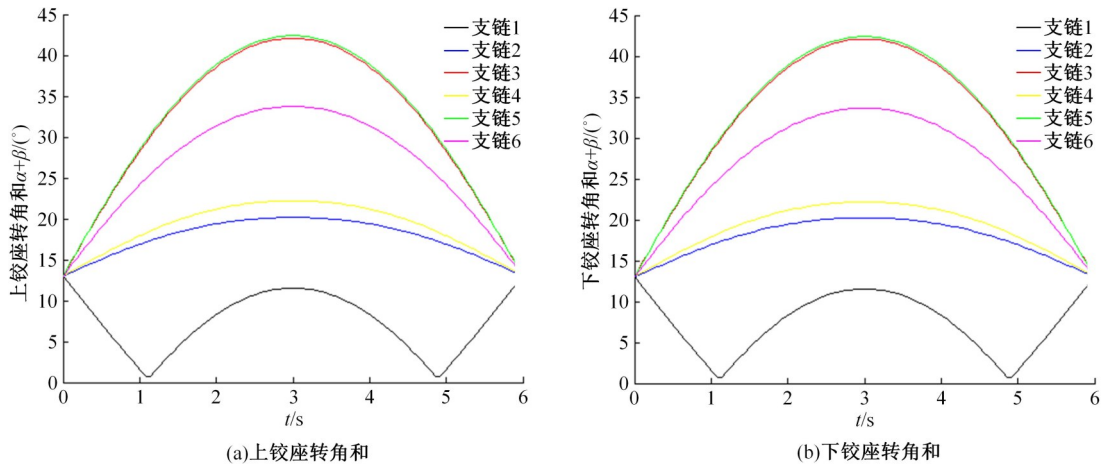


图 10 虎克铰转角和时域变化曲线

Fig. 10 Time domain variation curve of sum of Hooke joint angles

表 1 上铰座两轴转角及距离干涉点的角度

Table1 Angle of the two axes of the upper joint and the angle from the interference point

参数	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
RX/(°)	-0.8	19.7	18.9	-20.4	-18.0	0.7
RY/(°)	10.7	0.5	-23.2	1.9	-24.4	33.1
Error/(°)	33.8	25.5	3.9	23.1	4.2	11.5

全部远离转角极限,说明在极限位姿处,六自由度平台仍旧具有某个方向较强的运动能力。

对比表 1、表 2 和表 3 可知,4 个工况中第 3 和第 5 支链的铰座转角已经接近极限转角,说明以式(20)为约束条件,通过铰座转角计算规避了铰座干涉,扩大了六自由度平台在极限位姿的可达

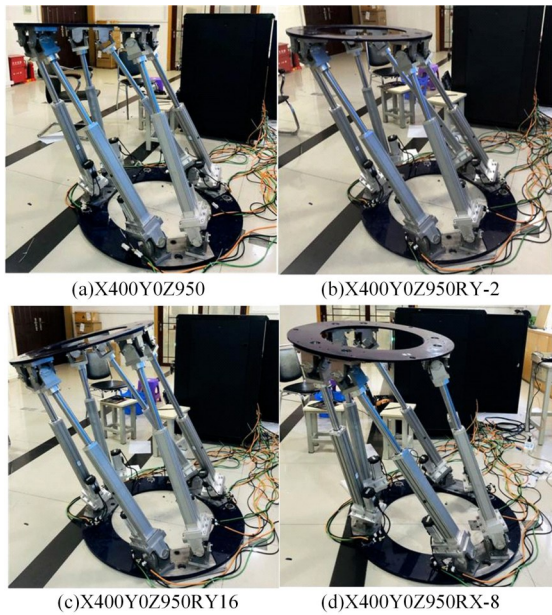


图 11 六自由度平台极限位姿运动试验

Fig. 11 Motion test of six degree of freedom platform under extreme pose conditions

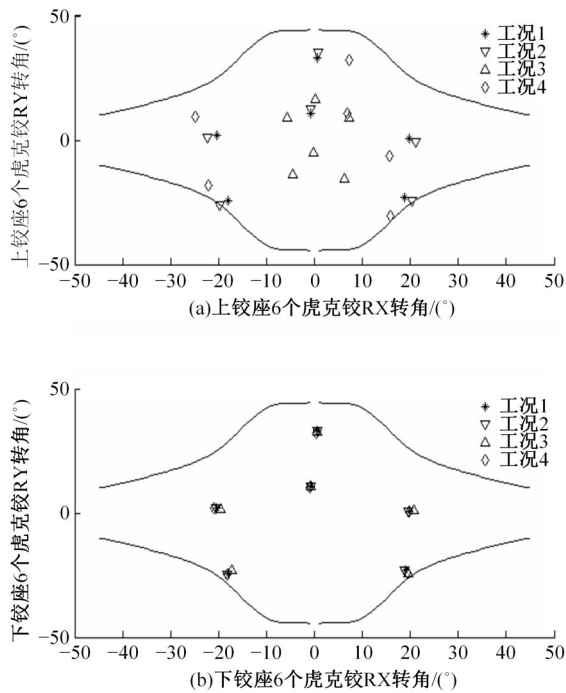


图 12 4 个工况的虎克铰转角分布情况

Fig. 12 Distribution of Hooke joint angle under four working conditions

表 2 上铰座距离干涉点的转角值

参数	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
error_RY-2/(°)	31.8	23.4	0.8	21.8	0.0	9.4
error_RY16/(°)	39.6	34.8	28.3	35.2	30.3	28.2
error_RX-8/(°)	33.3	26.7	1.9	11.3	4.5	11.8

表 3 下铰座距离干涉点的转角值

Table 3 Angle from lower joint to interference point

参数	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6
error_RY-2/(°)	33.8	25.7	4.3	23.0	3.7	11.5
error_RY16/(°)	33.7	23.5	1.9	24.5	6.8	12.0
error_RX-8/(°)	34.2	25.2	2.5	22.2	3.6	12.7

空间。

对比工况 1 和工况 2 可知,动平台绕 Y 轴转 -2° 时,第 3 支链和第 5 支链的上铰座已紧贴干涉点;对比工况 1 和工况 3 可知,动平台绕 Y 轴转 16° 时,下铰座距离干涉点还有 1.9° ,说明动平台在测试点处绕 Y 轴正反向转动范围不对称,有必要通过铰座干涉计算进行实时避障。

4 个工况中虽然电动缸行程存在较多余量,但铰座转角接近极限值,说明电动缸的行程约束容易满足,在根据动平台位姿反解电动缸行程和铰座转角时,铰座干涉计算应具有更高的优先级。

4 结 论

(1)斜棱柱虎克铰干涉计算表明,描述斜棱柱虎克铰工作空间的转角曲线为非线性函数,铰座转角由动平台位姿决定,相对于支链行程约束,铰座约束计算复杂,对工作空间影响显著。

(2)系列铰座约束仿真表明,不同支链的铰座运动随安装角变化而变化,当同一支链的两个固定支座在空间平行且动平台平动时,上、下两个铰座运动规律相同。

(3)六自由度平台极限位姿运动试验表明,铰座干涉求解算法与六自由度平台运动学反解算法结合是探索六自由度平台在非对称工作空间运动能力的有效工具。

参考文献:

[1] Furqan M, Suhaib M, Ahmad N. Studies on Stewart platform manipulator: a review[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2017, 31(9): 4459-4470.

[2] 丁明, 孟帅, 王书恒, 等. 六自由度波浪补偿平台的神经网络自适应反馈线性化控制[J]. 上海交通大学学报, 2022, 56(2): 165-172.

Ding Ming, Meng Shuai, Wang Shu-heng, et al. Neural-network-based adaptive feedback linearization control for 6-DOF wave compensation platform[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2022, 56(2): 165-172.

- [3] Li Z G, Yin Z M. The method of the flaps of C919 Aircraft manufacturing quality control[J]. Journal of Aerospace Science and Technology, 2020, 8(1): 19-24.
- [4] 刘玉梅, 刘丽, 曹晓宁, 等. 转向架动态模拟试验台避撞模型的构建[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2018, 48(6): 1661-1668.
Liu Yu-mei, Liu Li, Cao Xiao-ning, et al. Construction on collision avoidance model of bogie dynamics imulation test bench[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2018, 48(6): 1661-1668.
- [5] Chen D, Li S Q, Wang J F, et al. A multi-objective trajectory planning method based on the improved immune clonal selection algorithm[J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2019, 59: 431-442.
- [6] 杨超, 叶伟, 陈巧红. 并联机构敏感性分析和多目标优化设计方法[J]. 机械工程学报, 2022, 58(19): 229-241.
Yang Chao, Ye Wei, Chen Qiao-hong. Sensitivity analysis and multi-objective optimization design of parallel manipulators[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(19): 229-241.
- [7] Li S Q, Chen D, Wang J F. An optimal singularity-free motion planning method for a 6-DOF parallel manipulator[J]. Industrial Robot: the International Journal of Robotics Research and Application, 2020, 48(2): 290-299.
- [8] Mahmood A, Aminzadeh M, Menhaj M B, et al. A genealized method for determing load workspace of spatial parallel mechanism[C]//International Conference on Control and Automation, Xiamen, China, 2010: 1360-1365.
- [9] 程颖, 杨德华, 吴常铖, 等. 新型六自由度微动并联机构的工作空间分析[J]. 机械科学与技术, 2019, 38(3): 433-439.
- Cheng Ying, Yang De-hua, Wu Chang-cheng, et al. Workspace analysis of a novel 6-DOF parallel mechanism with micro displacement[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2019, 38(3): 433-439.
- [10] Pernkopf F, Husty M L. Workspace analysis of Stewart-gough-type parallel manipulators[J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 2006, 220(7): 1019-1032.
- [11] 陈晓光, 李超峰, 焦胜海, 等. 双端虎克铰 Hexaglide 并联机构零姿态工作空间分析[J]. 机械设计与制造, 2020, 11: 266-274.
Chen Xiao-guang, Li Chao-feng, Jiao Sheng-hai, et al. Position workspace analysis of the hexaglide parallel mechanism with double-end hooke hinges in kinematic chains[J]. Machinery Design and Manufacture, 2020, 11: 266-274.
- [12] 于晖, 孙立宁, 张秀峰, 等. 虎克铰工作空间研究及其在 6-HTRT 并联机器人中的应用[J]. 中国机械工程, 2002, 13(21): 1830-1834.
Yu Hui, Sun Li-ning, Zhang Xiu-feng, et al. Study on hooke joint and its application in 6-HTRT parallel robot[J]. China Mechanical Engineering, 2002, 13(21): 1830-1834.
- [13] Kong M X, Zhang Y, Sun L N. Analysis of a new workspace of the hexaglide as a motion tank[C]//International Conference on Mechatronics, Kumamoto, Japan, 2007: 1-6.
- [14] 孙立宁, 于凌涛, 杜志江, 等. 并联机器人胡克铰工作空间的研究与应用[J]. 机械工程学报, 2006, 42(8): 120-124.
Sun Li-ning, Yu Ling-tao, Du Zhi-jiang, et al. Study and application of workspace on hooke joint in parallel robot[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(8): 120-124.