3UPS-S 并联机构单支链驱动奇异分析

韩先国 刘岩龙

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)

摘 要: 并联机构进行单支链驱动时,由于受到其他支链的约束,不能实现全行程范围运动.为了分析并联机构单支链驱动受限的本质原因,采用旋量互易积的方法,计算单支链驱动的轴向速度分量.从计算结果可知,轴向速度为零时,单支链驱动到达边界.并联机构在输入空间发生驱动奇异,同时在工作空间发生位姿奇异,因此并联机构的驱动奇异就是位姿奇异.通过分析输入输出速度关系,并联机构到达输入空间边界.最后给出了并联机构单支链驱动的一般策略.

关 键 词: 并联机构; 单支链驱动; 旋量互易积; 输入空间边界

中图分类号: TH 113

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2014)01-0006-04

Singularity of 3UPS-S parallel mechanism in single limb motion

Han Xianguo Liu Yanlong

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: If only one limb of the parallel mechanism was driven, this limb can't move in full stroke because of the constraints from other limbs. In order to analyze the essential cause of single limb motion limit in parallel mechanism, the method of screw reciprocal product was adopted to calculate the axial velocity component. According to the result, when the axial velocity changes into zero, the single limb motion arrives boundary. The parallel mechanism is in single limb motion singularity from input space. At the same time the parallel mechanism is in configuration singularity from workspace. So the single limb motion singularity is equal to configuration singularity in parallel mechanism. By analyzing the input and output velocity at the moment, the parallel mechanism got to the boundary of input space. Finally the general strategy of single limb motion was given.

Key words: parallel mechanism; single limb motion; screw reciprocal product; boundary of input space

随着并联机构理论研究的发展与成熟,并联机构的应用领域越来越广泛,包括并联机床[1-2]、并联转台[3]、装配对接机构[4-5]等.并联机构是一种由多个并行支链构成的闭环系统,与传统串联机构相比,具有高刚度、高精度、高承载能力、结构简单等优点[6-7].

然而并联机构也有缺点,奇异问题就是广泛存在于并联机构中的一个固有难题,常见的有工作空间的位姿奇异和边界奇异[8].当并联机构发生位姿奇异时,锁定所有支链的驱动,动平台仍具有一个特定的瞬时螺旋运动,并联机构会发生失控的危险;当发生边界奇异时,并联机构会失去某个方向的运动自由度,此时无论多大的输入驱动,都不能使动平台产生运动,并联机构到达位姿空间边界.

目前已经有大量文献研究了工作空间的奇异问题[9-10],但已有的研究成果主要是从动平台工作空间来分析奇异问题,很少有文献从并联机构

收稿日期: 2013-03-23;**网络出版时间**: 2013-06-09 11:46

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20130609.1146.008,html

基金项目: 航空科学基金资助项目(20081651025)

作者简介: 韩先国(1970-),男,安徽来安人,副教授,hanxianguo2003@163.com.

支链的输入空间对奇异问题进行研究. 因此本文通过对 3UPS-S 并联转台单支链驱动问题进行分析,研究了并联机构的输入空间奇异问题,发现单支链驱动奇异即为位姿奇异,给出了并联机构输入空间边界的定义,最后确定了并联机构单支链归零的一般策略.

1　问题提出

为实现空间 3 自由度的转动功能,设计了一种 3UPS-S 并联转台,用于运动姿态模拟,其结构形式如图 1 所示. 该机构由动平台、静平台、中间支撑立柱和 3 个 UPS 支链组成,支链与静平台通过虎克铰 U 连接,与动平台通过球铰 S 连接,支链中间有移动副 P. 支撑立柱与动平台通过球铰连接,与静平台固连.

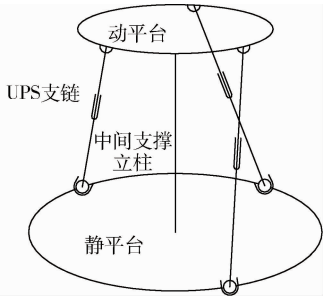


图 1　3UPS-S 并联转台原理图

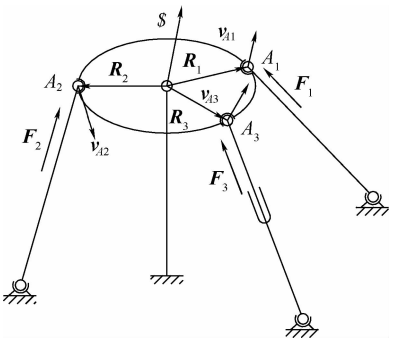
给定动平台的目标位姿,利用位置反解算法可以得到各支链的驱动杆长,通过驱动 3 个支链的移动副,改变支链杆长,对动平台进行运动控制;已知各支链杆长时,利用位置正解算法可以求出动平台的位姿角,再进行驱动控制. 但是当遇到突发情况,比如突然断电,系统重启后,丢失支链杆长值信息,又没有动平台的位姿角度,无法对并联转台进行运动控制.

发生这种情况时,需要进行各支链归零,就是使支链回到初始杆长. 在支链移动副中有零位开关,驱动支链伸缩到达零位开关,就实现了支链归零. 目前的归零方法是固定 2 个支链杆长不变,单独对第 3 个支链杆长进行调整,多次调整单支链杆长完成归零. 这种调整方法存在问题是,当固定 2 个支链杆长时,第 3 支链杆长无法实现全行程,在运动到某个杆长值后受到系统结构约束就无法再驱动,下面分析产生这种问题的原因.

2　单支链驱动的运动分析

2.1　利用旋量互易积求解动平台角速度

在并联机构动平台处于某个位姿时,固定 2 个支链杆长不变,分析第 3 个支链以及动平台的运动特点,如图 2 所示.



$A_i(i=1,2,3)$—动平台球铰;

$\boldsymbol{v}_{A_i}(i=1,2,3)$—球铰 A_i 的速度向量;

$\boldsymbol{R}_i(i=1,2,3)$—从立柱球铰中心指向 A_i 的向量;

$\$$—动平台的运动螺旋.

图 2　并联机构单支链运动分析

支链对动平台的作用力为 $\boldsymbol{F}_i(i=1,2,3)$,对动平台中心取矩为 $\boldsymbol{R}_i\times\boldsymbol{F}_i$,则支链对动平台的力矢为$(\boldsymbol{F}_i,\boldsymbol{R}_i\times\boldsymbol{F}_i)$,改写为 $f_i(\boldsymbol{l}_i,\boldsymbol{R}_i\times\boldsymbol{l}_i)$,其中 f_i 表示支链力数值,$\boldsymbol{l}_i$ 表示支链方向向量. 动平台转动角速度为 $\boldsymbol{\omega}$,由于中间支撑立柱的约束,不能移动,因此动平台的运动螺旋可表示为 $\$=(\boldsymbol{\omega},\boldsymbol{0})$.

支链 1 和支链 2 杆长固定,其支链力矢只对动平台产生约束作用,对动平台运动螺旋做功为零,因此支链 1 和 2 力矢与动平台运动螺旋互易积为零,即

$$f_i(\boldsymbol{l}_i,\boldsymbol{R}_i\times\boldsymbol{l}_i)\circ(\boldsymbol{\omega},\boldsymbol{0})=\boldsymbol{0}\qquad i=1,2 \tag{1}$$

展开为

$$f_i(\boldsymbol{l}_i\cdot\boldsymbol{0}+(\boldsymbol{R}_i\times\boldsymbol{l}_i)\cdot\boldsymbol{\omega})=\boldsymbol{0} \tag{2}$$

支链力不为 0,将上式化简为

$$(\boldsymbol{R}_i\times\boldsymbol{l}_i)\cdot\boldsymbol{\omega}=\boldsymbol{0} \tag{3}$$

即

$$\begin{pmatrix}\boldsymbol{R}_1\times\boldsymbol{l}_1\\ \boldsymbol{R}_2\times\boldsymbol{l}_2\end{pmatrix}\cdot\boldsymbol{\omega}=\boldsymbol{0} \tag{4}$$

该齐次线性方程组只有 2 个方程,求解动平台角速度向量 $\boldsymbol{\omega}$ 会有无穷多解,取其模长为 1 的基础解 $\boldsymbol{\omega}_0$ 作为动平台角速度方向向量.

接下来可以求出球铰 A_3 的速度方向向量

$$\boldsymbol{v}_{A_3}=\boldsymbol{\omega}_0\times\frac{\boldsymbol{R}_3}{|\boldsymbol{R}_3|} \tag{5}$$

将 $\boldsymbol{v}_{A_3}$向支链 3 投影,得到沿支链轴向驱动速度:

$$v_3=\boldsymbol{v}_{A_3}\cdot\boldsymbol{l}_3 \tag{6}$$

该投影值 v_3 的物理含义为:动平台的速度矢量模长为 1 时,支链 3 需要的驱动速度值. 当支链 3 轴向速度 $v_3\neq0$ 时,支链 3 可以伸缩运动;如果 $v_3=0$,则球铰速度 $\boldsymbol{v}_{A_3}$垂直于支链 $\boldsymbol{l}_3$,支链 3 不能进行伸缩运动,即支链 3 受到结构约束无法驱动.

2.2 计算实例

将上述分析结果应用于3UPS-S并联机构,动平台的工作空间用 ZXZ 欧拉角描述,具体为进动角 $\psi = 0 \sim 360°$,章动角 $\theta = 0 \sim 54°$,自旋角 $\varphi = -\psi$,反解计算出3个支链的行程:

$$\Delta L_1 = 172.076\ 0\ \text{mm}$$
$$\Delta L_2 = 172.172\ 1\ \text{mm}$$
$$\Delta L_3 = 172.099\ 5\ \text{mm}$$

各支链的零位姿初始杆长值分别为

$$L_{10} = 567.8\ \text{mm}$$
$$L_{20} = 566.1\ \text{mm}$$
$$L_{30} = 565.1\ \text{mm}$$

使支链1和2保持零位姿杆长值,支链3杆长为

$$L_3 = L_{30} + \Delta L$$

其中 ΔL 表示支链3杆长变化量,其取值范围为 $-86 \sim 86$ mm,即动平台实现工作空间时支链的全行程.进行支链3轴向速度计算的流程图如图3所示.

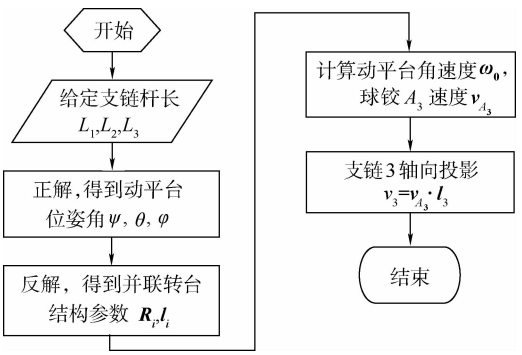


图3 计算流程图

从图4的曲线可知,当支链3杆长变化量为 -28 mm时,支链3的轴向驱动速度 $v_3 = 0$,此时支链3不能再进行驱动,因此支链3可驱动的杆长变量范围为 $-28 \sim 86$ mm.

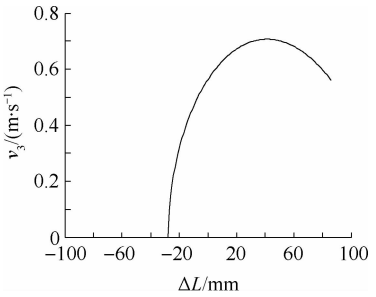


图4 支链3球铰速度方向向量沿支链轴向分量

2.3 单支链驱动特点

固定3UPS-S并联转台的2个支链,只对第3个支链进行驱动时,由于结构限制,其驱动范围具有边界,小于整个运动行程,单支链驱动杆长不能任意取值.

3 单支链驱动边界时的奇异分析

3.1 单支链驱动奇异与位姿奇异的关系

并联转台进行单支链驱动到达边界时,机构不能正常运动,将这种现象称为支链驱动奇异.为了分析并联机构发生驱动奇异时的约束情况,以图5所示的单支链运动机构进行说明.

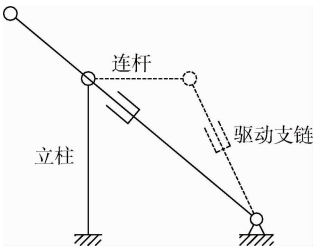


图5 单支链运动机构

图5的单支链运动机构中,连杆在驱动支链的伸缩杆作用下绕立柱固定点转动.当连杆旋转到与驱动支链共线时,驱动支链不能再伸长,杆长到达边界.此时支链的驱动力与立柱约束力共线,发生线性相关,支链不能再驱动.

同理,当并联转台的单支链运动到达边界时,该支链受到结构约束而不能再驱动,说明此时并联机构已具有沿第3支链方向的约束,第3支链与其他2个支链的约束产生线性相关.

并联转台的3个支链发生线性相关后,必然有1个支链的约束不起作用,系统的有效约束只剩下2个自由度,而动平台具有3个运动自由度,并联转台处于欠约束的状态下,整个机构位于奇异位姿.

因此可以判定并联机构单支链驱动到达边界时,并联机构发生位姿奇异,即单支链驱动奇异就是位姿奇异.

3.2 并联机构输入空间边界定义

在单支链驱动到达边界时,并联机构发生位姿奇异,其雅可比矩阵降秩,3个支链线性相关.对并联机构此时的速度关系进行分析.

$$\begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{R}_1 \times \boldsymbol{l}_1 \\ \boldsymbol{R}_2 \times \boldsymbol{l}_2 \\ \boldsymbol{R}_3 \times \boldsymbol{l}_3 \end{pmatrix} \boldsymbol{\omega} \tag{7}$$

式(7)中的系数矩阵即为雅可比矩阵,记为 $\boldsymbol{J}$,由式(7)可得

$$v_i = \boldsymbol{J}_i \boldsymbol{\omega} \qquad i = 1,2,3 \tag{8}$$

其中 $\boldsymbol{J}_i$ 表示雅可比矩阵的第 i 行.在奇异位姿处,雅可比矩阵的各行线性相关,因此有

$$\boldsymbol{J}_3 = k_1 \boldsymbol{J}_1 + k_2 \boldsymbol{J}_2 \tag{9}$$

其中 k_1 和 k_2 表示常系数.将式(9)代入式(8)可

得

$$v_3 = (k_1\boldsymbol{J}_1 + k_2\boldsymbol{J}_2)\boldsymbol{\omega} \tag{10}$$

化简为

$$v_3 = k_1 v_1 + k_2 v_2 \tag{11}$$

即支链 3 的驱动速度与支链 1 和 2 的驱动速度相关. 此时并联机构各支链的速度不能独立取值,各支链到达了位置空间边界.

从以上分析可以定义并联机构的输入空间边界:当并联机构发生位姿奇异时,各支链线性相关,支链驱动速度也线性相关,有一个支链的速度不能独立输入,从而使得输入向量降维,在该点处支链输入空间到达边界.

因此,当并联机构到达输入空间边界时,单支链发生驱动奇异,引起了各支链线性相关,并联机构处于奇异位姿.

4　单支链归零策略

3UPS-S 并联转台进行支链归零时,应使并联机构尽量避开奇异位姿,远离输入空间边界. 根据文献[11]研究,在靠近工作空间零位姿处,并联机构不容易发生奇异. 因此通过单支链调整,使动平台接近工作空间零位姿,来达到支链归零的目的.

在任意位姿下,3UPS-S 并联转台 3 个支链的最长杆与最短杆差值越大,动平台的位姿角就越大. 因此可以先将 3 个支链中的最长杆缩短,再将最短杆伸长,使 3 个支链杆长接近,这样就可以远离奇异位姿和支链杆长边界.

在进行支链杆长调整时,不能一次对某个支链进行大范围调整,而应按照少量多次的原则,每次对最长杆和最短杆调整较小的长度,分多次完成调整,才能避免单支链驱动到达输入边界.

这种单支链归零策略在实际应用于 3UPS-S 并联转台后,可以取得较好的位姿调整效果,能够使并联转台各支链顺利回到零位置.

5　结　论

1) 并联机构进行单支链驱动具有边界,杆长不能任意取值;

2) 并联机构的输入空间驱动奇异就是工作空间位姿奇异,此时并联机构到达输入空间边界;

3) 并联机构单支链驱动归零策略为:先将各支链中的最长杆缩短,再将最短杆伸长,并且分多次调整支链杆长,每次调整较小幅度.

参考文献 (References)

[1] Chanal H, Duc E, Ray P, et al. A new approach of the geometrical calibration of parallel kinematics machines tools based on the machining of a dedicated part[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacturing, 2007, 47(7/8): 1151-1163

[2] Daniel K, Philippe W, Damien C. Kinematic analysis of a serial-parallel machine tool: the VERNE machine[J]. Mechanism and Machine Tool, 2009, 44(2): 487 – 498

[3] 魏敏和,韩先国,张军. 3-UPS/S 并联转台球铰链的优化研究[J]. 航天制造技术,2011(3):19 – 23
Wei Minhe, Han Xianguo, Zhang Jun. Optimization research of spherical joints in 3-UPS/S parallel rotational table[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2011(3): 19 – 23 (in Chinese)

[4] 熊涛.卫星自动对接技术研究[J]. 航空制造技术,2011(22): 36 – 39
Xiong Tao. Automatic docking technology of satellite[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011(22): 36 – 39 (in Chinese)

[5] 曲艳丽,赵明扬,张崇峰. 空间对接机构缓冲系统及其运动学建模[J]. 上海航天,2002(1):13 – 16
Qu Yanli, Zhao Mingyang, Zhang Chongfeng. Damping mechanism for space docking and its kinematics modeling[J]. Aerospace Shanghai, 2002(1): 13 – 16 (in Chinese)

[6] 温兆麟,陈新,敖银辉,等. 并联机构应用的领域及其构型研究[J]. 机床与液压,2005(5):6 – 9
Wen Zhaolin, Chen Xin, Ao Yinhui, et al. Application area and structure study of parallel mechanism[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2005(5): 6 – 9 (in Chinese)

[7] Cha S H, Lasky T A, Velinsky S A. Determination of the kinematically redundant active prismatic joint variable ranges of a planar parallel mechanism for singularity-free trajectories[J]. Mechanism and Machine Theory, 2009, 44(5): 1032 – 1044

[8] 曹永刚,张玉茹. 6-RSS 型并联机构奇异性分析[J]. 机械工程学报,2008,44(6):79 – 87
Cao Yonggang, Zhang Yuru. Singularity analysis for 6-RSS parallel mechanism[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(6): 79 – 87 (in Chinese)

[9] Sandipan B, Ashitava G. Analysis of configuration space singluarities of closed-loop mechanism and parallel manipulators[J]. Mechanism and Machine Theory, 2004(39): 519 – 544

[10] Fang Hairong, Fang Yuefa, Zhang Ketao. Reciprocal screw theory based singularity analysis of a novel 3-DOF parallel manipulator[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012, 25(4): 647 – 653

[11] 韩先国,陈五一. 利用位置正解分析并联机构奇异分布规律[J]. 自然科学进展,2005,15(5):631 – 635
Han Xianguo, Chen Wuyi. Analysis of the rule of singularity in parallel mechanism via the forward displacement solution[J]. Process in Natural Science, 2005, 15(5): 631 – 635 (in Chinese)