DOI: 10.3901/JME.2013.01.001

动态式连接的少自由度混联机构的运动学分析*

郭希娟¹ 黄天宇² 常福清²

(1. 燕山大学信息科学与工程学院 秦皇岛 066004;

2. 燕山大学建筑工程与力学学院 秦皇岛 066004)

摘要: 动态式连接混联机构源于直升机自动倾斜器等效机构,可广泛应用于直升机旋翼系统中球铰轴承疲劳试验机。提出内外环嵌套动态式连接的一种新混联机构,其特点是将直升机自动倾斜器原来的上下混联机构改为内外环嵌套混联机构,内外环之间采用球铰副连接,从而可以使机构体积减小,降低耗能,提高机构高速旋转时的稳定性。依据螺旋理论和等效自由度的方法,计算该混联机构的自由度。应用数值方法针对该机构进行位置正解分析。根据正解分析该机构的工作空间。所得结果可为球铰轴承疲劳试验机的研制提供参考依据。

关键词: 少自由度 多重混联机构 等效自由度 位置正解 工作空间

中图分类号: TG156

Kinematics of a New Hybrid Mechanism with Reduced DOF and Nested Dynamic Connection

GUO Xijuan¹ HUANG Tianyu² CHANG Fuqing²

(1. College of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004;

2. College of Civil Engineering and Mechanics, Yanshan University, Qinhuangdao 066004)

Abstract: Dynamic connection hybrid mechanism derived from the auto-tilt device equivalent institutions of helicopter and can be widely used in the ball and socket bearing fatigue testing machine. Nested dynamic connection hybrid mechanism which transforms the upside and under hybrid mechanism of the helicopter automatic tilt to the inner and outer ring nested hybrid mechanism is proposed. Due to ball joints link between inner ring and outer ring, it has small size, low power consumption and high stability in the high-speed rotation. Based on screw theory, equivalent DOF approach is used in the DOF calculation of the hybrid mechanism. Numerical methods are used to solve positive displacement solution. According to the positive displacement solution, the workspace of the hybrid mechanism is analyzed. The results provide a reference for ball hinge bearing fatigue testing machine.

Key words: Reduced DOF Hybrid mechanism Equivalent DOF Positive displacement solution Workspace

0 前言

机构的构型由串联式、并联式向混联式发展。串联机构具有结构简单、操作空间大等优点,但串联机构需要在各关节上设置驱动装置,故各运动臂的运动惯量较大,因而不宜实现高速或超高速操作。与串联机构相比,并联机构具有承载能力大(刚度高)、响应速度快及运动精度高等优点,但并联机构

也存在自身的缺陷:工作空间小、结构尺寸偏大、传动环节过多等,制约了其应用。

混联机构简单说就是串联和并联机构的结合。合理的混联机构既弥补了串联机构在刚度、精度、实时控制方面的不足,又克服了并联机构在工作空间小、运动不灵活的缺点,兼具并联机构刚度好和串联机构工作空间大的优点,是今后机构学研究的一个重要的发展方向^[1]。

随着机构学的发展与工业生产的需要,国内外专家学者对混联机构进行了深入的研究,并设计完成了一些混联机构,可分为串并联混联机构和并并

* 国家自然科学基金资助项目(51175446)。20120517 收到初稿,20121024 收到修改稿

联混联机构。

串并联混联机构是由串联机构和并联机构组成。在国内,西安理工大学与秦川机床集团有限公司^[2]共同研制成功了一台采用三轴并联和三轴串联的六轴混联立式数控机。华中科技大学与台湾工业研究院^[3]也开发了一种串并联混联机床。清华大学刘辛军等^[4]提出了一种5自由度混联机构。东北大学^[5]开发了立卧转换式混联机床新构型。吉林大学研制了串并混联式研抛机床^[6],它由3轴并联机构和2轴串联机构组成。在国家“863计划”支持下,清华大学与齐齐哈尔第二机床(集团)公司联合研制成功了串并混联的五轴机床 XNZH2430^[7]。国外,ZAKERZADEH 等^[8]设计了一种专门用于弯曲管道攀爬的混联机构。KIM 等^[9]设计的一种五轴机床也是串并联混联结构。PINHAS 等^[10]提出了一种新型的混联机构设计模式。该机构模式由一个并联移动平台(实现移动定位)和一个串联操作手臂构成。KANAAAN 等^[11]给出了一种5自由度混联机床(VERNE 机构)。Tricept 机器人以及加拿大 Ryerson 大学研制的并联主轴头也都属于这类混联结构。

并联混联机构由两个以上并联机构串联组成。国内,姜铭等^[12]运用三个 RGR- I 并联双自由度转动机构构造了新型混联 6R 机器人。北京航空航天大学张志强等^[13]提出了一种能实现手部空间三维移动及一维转动的混联码垛机器人机构。国外 ROMDHANE^[14]给出了一种新型的混联机构。KIM 等^[15]提出了一种新的6自由度混联机构。

综上所述,混联机构已成为了机构学研究的新方向,在实际中的应用范围越来越广,作用越来越大。然而现有的混联机构研究都是针对静态固定式连接,一定程度上限制了其作用的发挥。

国内外学者对直升机旋翼系统从机构学的角度,也进行了一定的研究。RANJBARAN 等^[16]对 CL-327 直升机旋翼系统的自动倾斜器进行了简单的动力学分析和研究。BAUCHAU^[17]给出了一种铰接式直升机的旋翼系统的简图,给出了各个运动副之间的约束关系。KIM 等^[18]对一种自动倾斜器模型建立了动力学的方程,分析自动倾斜器的稳定性。KONDAK 等^[19]提出一种自动倾斜器操纵机构,并对机构进行了动力学分析。2009年,GUO 等^[20]对直升机旋翼系统上半部分的旋转环进行了分析,提出了一个等效的 3-RSS+PS+RRS 空间并联机构,对其速度和加速度进行了分析。杨育林等^[21]对直升机旋翼系统下半部分的不旋转环进行了动力学分析。

基于上述分析,现有的研究还少有将机构分析与球铰轴承试验相结合。因此,本文首先提出混联

机构“动态式连接”的概念,并在此基础上提出一种动态式连接的混联机构,对其进行运动学分析。研究结果具有一定的理论意义和实际应用价值。

1 自由度分析

动态式连接的概念:动态式连接的混联机构是指两个并联机构采用球铰副连接。

动态式连接混联机构由两部分组成:第一部分是内环(不旋转环)3自由度并联机构;第二部分是外环(旋转环)3自由度并联机构。其中内环并联机构由3个液压助力臂(SPS)和一个防扭力臂(RRS)构成,通过球铰轴承固定在主体上;外环并联机构由3个变距拉杆(SPS)和一个防扭力臂(RRS)连接内环和转动平台构成。内外和外环通过轴承连接。结构简图如图1所示。

图1 整体机构的等效结构简图

在整体机构中,液压助力器和变距拉杆的输出为线位移,用移动副 P 等效;它们与机构的连接处上端有关节球铰链,使内环绕球铰轴承球面做三维转动,用球副 S 等效;下端也有关节球铰链与机体相连,用球副 S 等效;则其在机构中用 SPS 支链等效。防扭臂通过螺栓与机体相连,防扭臂的中间环节也用螺栓连接,其相对运动均用转动副 R 表示;与内环的连接处内部也有关节球铰链,和内环之间的相对运动以球副 S 表示,通过支链限定平台绕 PS 链轴心的转动实现防扭作用。综上分析,防扭臂对内环的作用用 RRS 支链等效。球铰轴承与套筒之间为圆柱面,其相对运动用圆柱副 C 表示;内环与球铰轴承之间的相对运动为球面三维转动,用球副 S 表示,形成 CS 支链,但是此时的圆柱副 C 的转动轴线和球铰轴承三维转动副中的一个重合,是1个局部自由度,略去这个局部自由度,则球铰轴承与套筒可等效为 PS 支链。综上所述可以将机构等效为一个 2-RRS-6-SPS-1-PS 机构,

根据螺旋理论将机构的各个运动副表示为(S_0 ; S_0),其中 S 表示运动副轴线的单位矢量, $S_0=r \times S(r$

表示从原点到该轴线的矢径), 即 $\mathbf{S}$ 的线距。利用黄真等^[22]提出的修正的 Kutzbach-Grübler 公式来计算机构的自由度

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

式中, M 是机构的自由度; d 表示机构的阶数, 且 $d=6-\lambda$, λ 表示机构的公共约束; n 表示包括机架的构件数目; g 表示机构的总运动副数; f_i 表示第 i 个运动副的自由度; v 表示除去机构的公共约束后剩余螺旋所构成螺旋系的冗余约束数; ζ 表示机构中存在的局部自由度。

1.1 螺旋理论分析内环自由度

内环并联机构等效为 1-RRS-3-SPS-1-PS 并联机构, 如图 2 所示。

图 2 内环的等效结构简图

1.1.1 第 1 支链(RRS 链)的反螺旋

如图 3 所示, 建立支链坐标系 $O_1x_1y_1z_1$, O_1 为与主体连接的转动副轴线和第 1 支链的下杆件中心线的交点, x_1 轴沿转动副的轴线, y_1 轴垂直于定平台, 依据右手定则确定 z_1 轴方向。支链中的球副用 3 个转动副代替。

图 3 第 1 支链运动螺旋图

第 1 支链中各个转动副的运动螺旋为

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_{11} &= (1 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 0) \\ \mathbf{S}_{12} &= (1 \ 0 \ 0; 0 \ b_{12} \ c_{12}) \\ \mathbf{S}_{13} &= (0 \ m_{13} \ n_{13}; a_{13} \ 0 \ 0) \\ \mathbf{S}_{14} &= (1 \ 0 \ 0; 0 \ b_{14} \ c_{14}) \\ \mathbf{S}_{15} &= (0 \ n_{13} \ -m_{13}; a_{15} \ 0 \ 0) \end{aligned}$$

$$m_{13} = \cos\theta_3 = -\cos(\theta + \theta_1) \quad n_{13} = \cos\theta_4$$

$$m_{13}^2 + n_{13}^2 = 1$$

式中, a, b, c 表示各运动副轴线线距的计算结果, 具体由相应的位置决定。以下分析类同。依据运动螺旋和反螺旋的关系可得第 1 支链的反螺旋

$$\mathbf{S}_{11}^r = (1 \ 0 \ 0; 0 \ b_{14} \ c_{14}) \quad (2)$$

将以上在支链坐标系下得到的反螺旋变换到整体坐标系下可得

$$\mathbf{S}_1^r = (\mathbf{S}; \mathbf{r} \times \mathbf{S})$$

式中, $\mathbf{S} = (1 \ 0 \ 0)$, $\mathbf{r}$ 为整体坐标系原点到球副 S 所在点的矢量。

1.1.2 第 2 支链的反螺旋

如图 4 所示, 建立支链坐标系 $O_2x_2y_2z_2$, O_2 为下端球副的中心点, x_2 轴垂直于中间移动副的轴线, z_2 轴沿着移动副的轴线上, 依据右手定则确定 y_2 轴方向。支链中的球副也用 3 个转动副代替。

图 4 第 2(3, 4)支链运动螺旋图

第 2 支链中各个运动副的运动螺旋为

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_{21} &= (1 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 0) \\ \mathbf{S}_{22} &= (0 \ 1 \ 0; 0 \ 0 \ 0) \\ \mathbf{S}_{23} &= (0 \ 0 \ 1; 0 \ 0 \ 0) \\ \mathbf{S}_{24} &= (0 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 1) \\ \mathbf{S}_{25} &= (0 \ 0 \ 1; 0 \ 0 \ 0) \\ \mathbf{S}_{26} &= (1 \ 0 \ 0; 0 \ b_{26} \ 0) \\ \mathbf{S}_{27} &= (0 \ 1 \ 0; a_{27} \ 0 \ 0) \end{aligned}$$

依据运动螺旋和反螺旋的关系可知第 2 支链不存在反螺旋, 但是存在一个局部自由度。第 3、4 支链的反螺旋的求解与第 2 支链类似, 同理这两个支链也各存在一个局部自由度。

1.1.3 第 5 支链的反螺旋

如图 5 所示, 建立支链坐标系 $O_5x_5y_5z_5$, O_5 为定平台中心点, x_5 轴垂直于移动副的轴线, z_5 轴垂直于定平台, 依据右手定则确定 y_5 轴方向。支链中的球副也用 3 个转动副代替。则第 5 支链中各个转动副的运动螺旋

$$\mathbf{S}_{51} = (0 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 1)$$

$$\begin{aligned}\mathbf{S}_{52} &= (0 \ 0 \ 1; 0 \ 0 \ 0) \\ \mathbf{S}_{53} &= (1 \ 0 \ 0; 0 \ b_{53} \ 0) \\ \mathbf{S}_{54} &= (0 \ 1 \ 0; a_{54} \ 0 \ 0)\end{aligned}$$

图 5 第 5 支链运动螺旋图

依据运动螺旋和反螺旋的关系可得第 5 支链的反螺旋为

$$\mathbf{S}_{51}^r = (1 \ 0 \ 0; 0 \ a_{54} \ 0) \quad (3)$$

$$\mathbf{S}_{52}^r = (0 \ 1 \ 0; -b_{53} \ 0 \ 0) \quad (4)$$

由式(2)~(4)可知, $\mathbf{S}_1^r$ 表示了过第 1 支链球副中心点且与整体坐标系 x 轴平行的力矢, 而这一力矢约束了第 1 支链中球副绕 Z 轴的转动; $\mathbf{S}_{51}^r$ 表示了一个通过球副平行于 x 轴的力矢, 这一力矢约束了动平台沿 x 轴的移动; $\mathbf{S}_{52}^r$ 表示了一个通过球副平行于 y 轴的力矢, 这一力矢约束了动平台沿 y 轴的移动。

通过以上分析, 可知 3 个反螺旋限制了机构的 3 个自由度, 则可知机构的自由度为 3。通过观察可知 3 个反螺旋线性无关, 因此不存在与所有运动螺旋都相逆的反螺旋, 则此并联机构不存在公共约束。从而可知 $\lambda=0$, $n=11$, $g=14$, $v=0$, $\zeta=3$ 。由式(1)可得机构的自由度

$$M = 6 \times (11 - 14 - 1) + 8 \times 3 + 4 + 2 - 3 = 3$$

综上所述, 内环并联机构为一个 3 自由度机构。它在整体机构中可以看作为绕不旋转环中心的 3 个自由度。由于下操纵机构与上操纵机构的结构相同, 约束相同, 故在整体的计算中上操纵机构与下操纵机构具有相同的自由度, 这里不再计算。

1.2 等效自由度法分析机构的自由度

等效自由度法是将机构整体中的一部分机构看做一个与该部分机构自由度相同的运动副, 然后利用传统方法计算机构自由度。整机机构可看作为, 内环并联机构(3 自由度)、转动副、外环并联机构(3 自由度)3 个等效运动副构成的等效串联机构。整体机构的等效简图如图 6 所示。

将上下机构的自由度等效在旋转环平面上, 则有以下关系。

(1) 内环等效机构

图 6 整体机构等效简图

$$\mathbf{S}_1 = (1 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 0)$$

$$\mathbf{S}_2 = (0 \ 1 \ 0; 0 \ 0 \ 0)$$

$$\mathbf{S}_3 = (0 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 1)$$

(2) 转动副

$$\mathbf{S}_4 = (0 \ 0 \ 1; 0 \ 0 \ 0)$$

(3) 外环等效机构

$$\mathbf{S}_5 = (1 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 0)$$

$$\mathbf{S}_6 = (0 \ 1 \ 0; 0 \ 0 \ 0)$$

$$\mathbf{S}_7 = (0 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 1)$$

依据运动螺旋和反螺旋的关系可得

$$\mathbf{S}_1^r = (1 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 0)$$

平行于 x 轴的力矢, 约束了机构沿 x 轴的移动

$$\mathbf{S}_2^r = (0 \ 1 \ 0; 0 \ 0 \ 0)$$

平行于 y 轴的力矢, 约束了机构沿 y 轴的移动。

通过以上分析可知, 3 个反螺旋限制了机构的 2 个自由度, 则机构的自由度为 4。其中机构具有 3 个局部自由度。因为 2 个反螺旋线性无关, 因此不存在与所有运动螺旋都相逆的反螺旋, 则此并联机构不存在公共约束。从而可知 $\lambda=0$, $n=4$, $g=7$, $v=0$, $\zeta=3$ 。

机构的自由度

$$M = 6 \times (4 - 3 - 1) + 7 - 3 = 4$$

整体机构是一个 4 自由度机构。

2 位置分析

在整个系统位置分析的简化模型中内环并联机构是整个机构的核心, 内外环机构具有结构相似性, 故在以下的位置分析中以内环并联机构为核心计算系统的液压助力器的输入方程。杆长 $l_i (i=2, 3, 4)$ 的变化通过机构改变平台位姿, 如图 7 所示。

图 7 内环正解求解示意图

采用数值法求机构的位置正解。设已知初始位置时上、下平台中与液压助力器各连接点的初始坐标值以及 2、3、4 支链的杆长 $l_i (i=2, 3, 4)$, 求解上平台运动转角 α 、 β 以及中间球副的移动距离 P_z 。具体求解过程如下。

(1) 设下平台 4 个点 C_i 在定坐标系 $Oxyz$ 中的坐标值

$$\begin{pmatrix} C_{ix} \\ C_{iy} \\ C_{iz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_i \\ b_i \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{cases} C_1 = (C_{1x}, C_{1y}, C_{1z}) = (r_1, 0, 0) \\ C_2 = (C_{2x}, C_{2y}, C_{2z}) = (0, r_1, 0) \\ C_3 = (C_{3x}, C_{3y}, C_{3z}) = (-r_1, 0, 0) \\ C_4 = (C_{4x}, C_{4y}, C_{4z}) = (0, -r_1, 0) \end{cases}$$

(2) 设上平台 4 个点 A'_i 在动坐标系 $O_n x_n y_n z_n$ 中的坐标值

$$\begin{pmatrix} a'_{ix} \\ a'_{iy} \\ a'_{iz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_i \\ q_i \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{cases} A'_1 = (a'_{1x}, a'_{1y}, a'_{1z}) = (r_2, 0, 0) \\ A'_2 = (a'_{2x}, a'_{2y}, a'_{2z}) = (0, r_2, 0) \\ A'_3 = (a'_{3x}, a'_{3y}, a'_{3z}) = (-r_2, 0, 0) \\ A'_4 = (a'_{4x}, a'_{4y}, a'_{4z}) = (0, -r_2, 0) \end{cases}$$

(3) 第 5 支链中心球副在动坐标系和定坐标系中的坐标值

$$\begin{matrix} P_{S_N} (x & y & z) = (0 & 0 & 0) \\ P_{S_O} (x & y & z) = (0 & 0 & z) \end{matrix}$$

(4) 变换矩阵

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} l_x & m_x & n_x & 0 \\ l_y & m_y & n_y & 0 \\ l_z & m_z & n_z & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{matrix} l_x = \cos \beta & l_y = 0 & l_z = -\sin \beta \\ m_x = \sin \alpha \sin \beta & m_y = \cos \alpha & m_z = \sin \alpha \cos \beta \\ n_x = \cos \alpha \sin \beta & n_y = -\sin \alpha & n_z = \cos \beta \cos \alpha \end{matrix}$$

上平台 4 个点变换后坐标值

$$\begin{pmatrix} A_{ix} \\ A_{iy} \\ A_{iz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_i l_x + q_i m_x \\ q_i m_y \\ p_i l_z + q_i m_z + z \end{pmatrix} \quad (5)$$

则 2、3、4 支链的杆长可表示为

$$l_i^2 = (p_i l_x + q_i m_x - a_i)^2 + (q_i m_y - b_i)^2 + (p_i l_z + q_i m_z + z)^2 \quad (6)$$

将坐标及变换矩阵 $\mathbf{T}$ 代入式(6), 并化简后可得

$$p_i \omega_1 + q_i \omega_2 - C_i m_y = A_i l_x + B_i m_x + D_i \quad i = 2, 3, 4 \quad (7)$$

其中两个中间变量 w_1 和 w_2 为

$$w_1 = l_z \times z \quad w_2 = m_z \times z$$

$$A_i = p_i a_i \Rightarrow \begin{cases} A_2 = 0 \\ A_3 = r_1 r_2 \\ A_4 = 0 \end{cases} \quad B_i = q_i a_i = 0$$

$$C_i = q_i b_i \Rightarrow \begin{cases} C_2 = r_1 r_2 \\ C_3 = 0 \\ C_4 = r_1 r_2 \end{cases}$$

$$D_i = (l_i^2 - a_i^2 - b_i^2 - p_i^2 - q_i^2 - z^2)/2 \Rightarrow$$

$$\begin{aligned} D_2 &= (l_2^2 - r_1^2 - r_2^2 - z^2)/2 \\ D_3 &= (l_3^2 - r_1^2 - r_2^2 - z^2)/2 \\ D_4 &= (l_4^2 - r_1^2 - r_2^2 - z^2)/2 \end{aligned}$$

式(7)为一含有 6 个未知数的 3 个方程组成的线性方程组, 以 l_x, m_x, z 作为基本变量, w_1, w_2, m_y 可以表达成这 3 个变量的函数, 则

$$\begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ m_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_2 & q_2 & -C_2 \\ p_3 & q_3 & -C_3 \\ p_4 & q_4 & -C_4 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} A_2 l_x + B_2 m_x + D_2 \\ A_3 l_x + B_3 m_x + D_3 \\ A_4 l_x + B_4 m_x + D_4 \end{pmatrix} =$$

$$\begin{pmatrix} 0 & r_1 & r_1 r_2 \\ -r_1 & 0 & 0 \\ 0 & -r_1 & r_1 r_2 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} (l_2^2 - z^2 - r_1^2 - r_2^2)/2 \\ r_1 r_2 l_x + (l_3^2 - z^2 - r_1^2 - r_2^2)/2 \\ (l_4^2 - z^2 - r_1^2 - r_2^2)/2 \end{pmatrix}$$

则由上式就可以组成一个三元二次方程

$$\begin{cases} 2r_1 \sin \beta \times z - [2r_1 r_1 \cos \beta + l_3^2 - z^2 - r_1^2 - r_2^2] = 0 \\ 4r_1 z \sin \alpha \cos \beta - (l_2^2 - l_4^2) = 0 \\ 4r_1 r_2 \cos \alpha - (l_2^2 + l_4^2 - 2z^2 - 2r_1^2 - 2r_2^2) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

由式(8)可知当 3 个液压杆的输出和结构参数确定时, 机构的输出位形是确定的。这里设定初始参数: 定平台半径 $r_1=150$ mm, 动平台半径 $r_2=150$ mm, 两平台初始距离 $H=100$ mm, 经过求解整理后, 列出其中主要的 8 组解, 如表 1 和表 2 所示。

表 1 液压杆的输入 mm

液压杆	液压杆杆长输入值							
	1	2	3	4	5	6	7	8
杆 l_2	10	14	14	10	12	12	12	14
杆 l_3	10	14	12	12	14	10	12	14
杆 l_4	10	14	10	14	12	12	12	10

表 2 上平台的位姿参数变化

位姿	位姿输出值							
	1	2	3	4	5	6	7	8
$\alpha/^\circ$	0	0	7.7	-7.7	0	0	0	7.7
$\beta/^\circ$	0	0	0	0	7.7	-7.7	0	7.7
P_z/mm	0	4	2	2	2	2	2	2

3 工作空间分析

通过以上的数据分析,利用 Matlab 软件分析得到球铰轴承内部发生相对转动处任一点的工作空间。这里将球铰轴承的接触面等效为一点,取通过液压杆 2、杆 4 和主体主轴的面为研究对象。机构中内环与球铰轴承直接接触,且内环是液压助力器的直接作用点。内环外环通过轴承连接,内环作用外环使其在机构上做出和内环同样的运动方式,故将外环忽略。对机构做如下简化,得到如图 8 所示简图。

图 8 通过液压杆 2、杆 4 和主体主轴的截面示意简图

该点在机构运动变化时的在上述截面上的工作范围如图 9 所示。

图 9 通过液压杆 2、杆 4 和主体主轴在截面上该点的工作空间

由于整体结构的对称性,则在通过主体主轴上任一截面上,球铰轴承上发生相对转动位置的工作空间具有一致性,故不再讨论。工作空间分析进一步展现了球铰轴承内部发生相对转动处任一点的空间变化状况,为分析球铰轴承在高速运动状况下的各项应力分布状况提供参考。其工作空间如图 10 所示。

图 10 不同截面处的工作空间

4 结论

(1) 本文通过等效自由度法计算了内外环嵌套式混联机构的自由度为 4。等效自由度法将混联机构的自由度求解方式简化为串联机构从而使计算简单、快捷。

(2) 利用数值法分析了机构的位置正解,得到该机构在一定输入状态下的输出范围。为后期的速度、加速度等后期计算奠定基础。

(3) 通过对球铰轴承内部发生相对转动处任一点的工作空间分析,可以得到球铰轴承在工作状态下空间位置的变化状况。确定球铰轴承上工作状况,为球铰轴承疲劳试验机的研制提供依据。

参 考 文 献

- [1] 姜铭,孙钊,秦康生,等. 混联机器人的分析及研究[J]. 制造业自动化, 2009, 31(1): 61-65.
JIANG Ming, SUN Zhao, QIN Kangsheng, et al. Study on serial-parallel mechanisms[J]. Manufacturing Automation, 2009, 31(1): 61-65.
- [2] 黄玉美,高峰,史文浩. 混联式数控机床的发展[J]. 制造技术与机床, 2001, 12(8): 8-9.
HUANG Yumei, GAO Feng, SHI Wenhao. Development in CNC series-parallel machine tool[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2001, 12(8): 8-9.
- [3] 赵俊伟,徐振高,范光照,等. 一种串并联型机床及其误差分析[J]. 中国机械工程, 2001, 12(8): 861-864.
ZHAO Junwei, XU Zhengao, FAN Guangzhao, et al. A serial-parallel type machine tool and its error analysis[J]. China Mechanical Engineering, 2001, 12(8): 861-864.
- [4] LIU X J, TANG X Q, WANG J S. A novel 2-DOF parallel mechanism based design of a new 5-axis hybrid machine tool[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation, September 14-19, 2003, Taipei, Taiwan, China. New York: IEEE, 2003: 3990-3995.
- [5] 孟祥志,蔡光起,胡明,等. 三杆混联数控机床的动力学[J]. 机械工程学报, 2006, 42(6): 112-119.
MENG Xiangzhi, CAI Guangqi, HU Ming, et al. Dynamics of three hybrid CNC machine tool[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(6): 112-119.
- [6] 韩霜,赵继,刘志新. 串-并混联式研抛机床的开放式数控系统研究[J]. 中国机械工程, 2007, 18(16): 1913-1916.

- HAN Shuang, ZHAO Ji, LIU Zhixin, Research on open architectural CNC system of serial-parallel hybrid polishing machine[J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(16): 1913-1916.
- [7] 刘光森, 王振宇. XNZ2430 重型龙门混联机床简介[J]. 设备管理与维修, 2008(5): 30.
- LIU Guangmiao, WANG Zhenyu. Introduction of heavy-duty gantry hybrid machine tool[J]. Plant Maintenance Engineering, 2008(5): 30.
- [8] ZAKERZADEH M R, TAVAKOLI M, VOSSOUGH G R, et al. Inverse kinematic/dynamic analysis of a new 4-DOF hybrid (serial-parallel) pole climbing robot manipulator[J]. Climbing and Walking Robots, 2005(3): 919-934.
- [9] KIM J W, KIM H Y, KIM H S. Accuracy improvement of a 5-axis hybrid machine tool[C]// Proceedings of the 12th International Symposium on Artificial Life and Robotis, January 25-27, 2007, Oita, Japan. Oita, Japan: AROB, 2007: 239-243.
- [10] PINHAS B T, ANDREW A G, JEAN W Z. Design and analysis of a hybrid mobile robot mechanism with compounded locomotion and manipulation capability[J]. Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME, 2008, 130(7): 0723021-07230213.
- [11] DANIEL K, PHILIPPE W, DAMIEN C. Kinematic analysis of a serial-parallel machine tool: The VERNE machine[J]. Mechanism and Machine Theory, 2009, 44(2): 487-498.
- [12] 姜铭, 易红, 李鹭扬, 等. RGRR-I 构造混联 6R 机器人[J]. 机械工程学报, 2010, 46(1): 30-36.
- JIANG Ming, YI Hong, LI Luyang, et al. Hybrid serial-parallel 6R robot made of RGRR-I[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(1): 30-36.
- [13] 张志强, 臧冀原, 负超. 混联码垛机器人运动学分析及仿真[J]. 机械设计, 2010, 27(11): 47-51.
- ZHANG Zhiqiang, ZANG Yiyuan, YUN Chao. Kinematics analysis and simulation of hybrid palletizing robot[J]. Machine Design, 2010, 27(11): 47-51.
- [14] ROMDHANE L. Design and analysis of a hybrid serial-parallel manipulator[J]. Mechanism and Machine Theory, 1999, 34(7): 1037-1055.
- [15] KIM S M, KIM W, CHUNG J, et al. A hybrid 6-DOF mechanism with closed-form position solutions employing two 3-DOF modules with decoupled output motions[C]// Conference on Control and Automation, December 9-11, 2009, Christchurch, New Zealand. New York: IEEE, 2009: 1027-1032.
- [16] RANJBARAN F, LANGE C, ANGELES J. The kinematics and dynamics of the swashplate of the CL-327[R]. Quebec, 1997.
- [17] BAUCHAU A. Modeling rotorcraft dynamics with finite element multibody procedures[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2001, 33: 1113-1137.
- [18] KIM S K, TILBURY D M. Mathematical modeling and experimental identification of an unmanned helicopter robot with flybar dynamics[J]. Journal of Robotic Systems, 2004, 21(3): 95-116.
- [19] KONDAK K, DEEG C, HOMMEL G, et al. Mechanical model and control of an autonomous small size helicopter with a stiff main rotor[C]// Proceedings of 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 2004, Sep. 28-Oct. 2, 2004, Sendai, Japan. New York: IEEE, 2004: 2469-2474.
- [20] GUO X J, ZHANG Q, DU X, et al. Analysis for dynamics performance indices of 3-RSS+PS+RRS parallel mechanism[J]. ICIC Express Letters, 2009, 3(3): 793-798.
- [21] DU X, YANG Y L, GUO X J, et al. Mechanic performance index analysis for 3-SPS+RRS+PS mechanism[J]. ICIC Express Letters, 2009, 3(3): 355-360.
- [22] 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.
- HUANG Zhen, ZHAO Yongsheng, ZHAO Tieshi. The screw theory of the advanced spatial mechanism[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.

作者简介: 郭希娟, 女, 1959 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为计算机器人理论。

E-mail: xjguo@ysu.edu.cn

黄天宇, 男, 1983 年出生。主要研究方向为型钢结构强度。

E-mail: htyu3000@163.com

常福清, 男, 1955 年出生, 教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为型钢结构强度、电磁场的力学效应。

E-mail: changfq@ysu.edu.cn