

文章编号:1000-6893(2002)05-0487-04

采用冗余驱动提高并联机床精度的研究

韩先国, 陈五一, 郭卫东

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100083)

NEW APPROACH TO IMPROVE ACCURACY OF PKMS BY REDUNDANT CONTROL

HAN Xian-guo, CHEN Wu-yi, GUO Wei-dong

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

摘要: 由于并联机构铰链间隙的存在,使并联机构的实际精度和刚性明显减小。本文论述了采用冗余驱动技术改善并联机构精度的研究。首先分析了可以将铰链间隙对并联机构运动误差的影响转化为杆长偏差对机构误差的影响;然后通过分析得出:由于铰链间隙的影响,并联机构运动空间是空间几个球环的交集,采用数值法,利用球坐标数值积分求出误差空间的体积大小;最后对具有相同结构参数的非冗余和具有冗余驱动两种并联机构,在同样的工作空间内分别计算了误差分布,得出采用冗余驱动技术可以有效减小因铰链间隙而引起的并联机构运动误差的结论。

关键词: 并联机构; 冗余驱动; 铰链间隙; 误差; 工作空间

中图分类号: TG502.13 **文献标识码:** A

Abstract: The accuracy and rigidity of a parallel manipulator decrease much because of its joint clearance, so the redundant control was presented to improve the accuracy. Firstly, the reason that the effect of the joint clearance on the accuracy of the parallel manipulator is the same as the length error of the leg was given, and then it can be derived that the error workspace is the intersection of several parts of the sphere. The errors between two mechanisms in the whole workspace were compared after the solution to get the error workspace volume is given. The conclusion that redundant control can improve accuracy was drawn at last.

Key words: parallel manipulator; redundant control; joint clearance; error; workspace

并联机床具有刚度重量比大、响应速度快、适合于复杂型面加工、机床结构简单、技术附加值高、机床部件便于模块化设计和批量生产等优点。理论上讲,并联机床的运动链误差不叠加,各支链一般为二力杆,因而刚性高、误差小。但实际上并联机床的精度和刚性并未高于传统机床,某些情况下甚至低于传统机床。这是影响并联机床实用化的主要原因之一。并联机床的每一个支链均通过铰链与动、静平台相连,正是由于铰链的精度、间隙和接触刚性等问题,使得并联机床的实际精度和刚性大打折扣。

提高铰链的精度和刚性一般主要靠提高加工精度、提高表面质量和减小铰链间隙等措施,但加工精度的提高和铰链间隙的减小均有限度,而且随着运动副的磨损精度会逐渐降低。为消除铰链间隙还可采用经预紧的滚动球铰或磁性铰链,但滚动球铰使连杆的活动范围减小,从而缩小了已

经不大的工作空间;而磁性铰链由于可承载的拉伸力小,而只能用于三坐标测量机等场合。本文针对采用冗余驱动控制技术来减小误差进行了理论探讨,经仿真证明这一技术可以有效减小并联机构运动误差。

并联机构的冗余控制已有报道。G. F. Liu^[1]将冗余控制分为运动学冗余(kinematic redundancy)、约束冗余(over constraints)和驱动冗余(over actuation),通过分析得出驱动冗余能够减小并联机构雅可比矩阵的条件数(增加灵活度)和增加并联机构的刚度,并为冗余驱动提供了控制算法。吴宇列^[2]研究了具有冗余驱动的一个2自由度并联机构的动力学方程及其控制方法。Zhang和Duffy^[3,4]研究了由8条伸缩杆支链驱动的6自由度平台,提出了一项综合质量指标,用于表征灵活度、奇异性和工作空间。为提高并联机床精度而对冗余驱动并联机构进行的深入研究尚未见报道。

1 具有冗余控制的并联机构

图1为非冗余驱动的3-PSS并联机构。该机

收稿日期:2002-06-02; 修订日期:2002-07-08

基金项目:航空科学基金(99H51124)资助项目

文章网址: <http://www.hkxb.net.cn/2002/05/0487/>

构由动、静平台和3组导轨-滑块-支链组成,每条支链含有两根平行等长的杆,每组杆通过球铰链连接滑块和动平台。滑块在伺服电机-丝杠-螺母副驱动下沿导轨作水平运动,进而使动平台作三维平动。由于球铰链副存在间隙,势必减小机构的刚度和运动精度。为了增加刚度和减小因铰链间隙而引起的误差,在原机构的基础上增加一组导轨-滑块-支链,形成带有冗余驱动4-PSS并联机构(如图2所示)。



图1 非冗余驱动的3-PSS并联机构模型图

Fig. 1 The model of 3-PSS no redundant actuated parallel manipulator



图2 具有冗余驱动4-PSS并联机构模型图

Fig. 2 The model of 4-PSS redundant actuated parallel manipulator

2 并联机构的球铰间隙的影响

球形铰链是并联机床中普遍采用的一种铰链。球形铰链理论上具有结构简单、运动灵活、耐磨性好和承载力强的优点。实际应用中球铰中的球和球窝存在相对运动,势必存在间隙误差,球铰间隙一般至少 $20 \sim 30 \mu\text{m}$,因而减小因铰链间隙而引起的误差是提高并联机构精度的一个关键因素。

如图3所示,球铰分别为受压和受拉两种的情况。此时,球和球窝之间存在间隙, O_1 为球窝中心, O_2 为球铰中心, $|O_1 O_2|$ 为从球窝中心到球中心的距离。忽略铰链摩擦,支链杆为二力杆,球在球窝中的所受到的反力方向必为杆的方向才能平衡,即 $O_1 O_2$ 必在杆的方向上,这时当球铰受

压或受拉时,杆长实际上相当于缩短或伸长了 $|O_1 O_2|$,球铰间隙的影响如同杆长改变的相同的长度。所以,在计算铰链间隙对动平台的误差大小,可以转化到杆长误差对动平台位置误差。

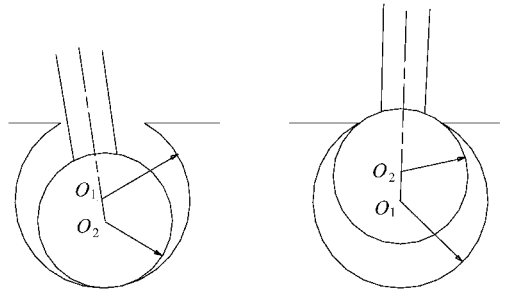


图3 球铰间隙对杆长影响

Fig. 3 The effect of the joint clearance on the length of leg

3 考虑球铰间隙的并联机构的误差计算

(1) 非冗余并联机构的误差分析

由于每组中的两杆运动始终相同,所以该机构可简化为如图4所示,静平台为一等边三角形,坐标系取为三角形的中心, R 为静平台半径, l 为三杆的杆长, P_1 , P_2 和 P_3 分别为三滑块的位置。

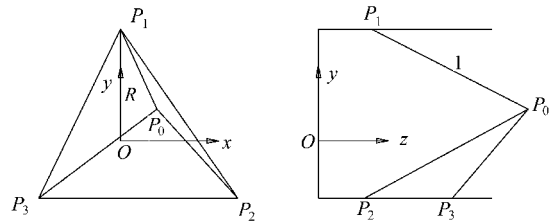


图4 非冗余驱动并联机构等效结构原理图

Fig. 4 The equivalent sketch of no redundant parallel manipulator

先分析非冗余并联机构动平台中心在点 P_0 ($x_0 \ y_0 \ z_0$)的误差。根据该机构的位置反解,确定3个滑块的位置:($z_1 \ z_2 \ z_3$)。如果球铰没有间隙,当滑块在($z_1 \ z_2 \ z_3$)位置时,动平台中心点应在准确位置($x_0 \ y_0 \ z_0$)。由于铰链间隙的存在,动平台中心位置应该是一个空间范围,也是动平台中心点的误差范围。由于每组杆相距较近,为简化起见,假设每组杆同时受拉或受压,即每组杆长度始终保持相等。这个空间范围应该是3组杆的杆长由 l 变化到 $l+e$ (e 为球铰间隙)时的动平台活动范围。该范围任一点 P 可表示为

$$|PP_i| = r_i \quad (i = 1, 2, 3; l \leq r_i \leq l + e) \quad (1)$$

事实上该范围几何意义为:3个球心分别为

$P_i (i = 1, 2, 3)$; 半径 $l \leq r_i \leq l + e$ 球环的交集。

(2) 冗余驱动并联机构的误差分析

该机构可简化为如图 5 所示。静平台为一等边四边形,坐标系取为等边四边形的中心; R 为静平台半径; l 为四杆的杆长; P_1, P_2, P_3 和 P_4 分别为 4 个滑块的位置。

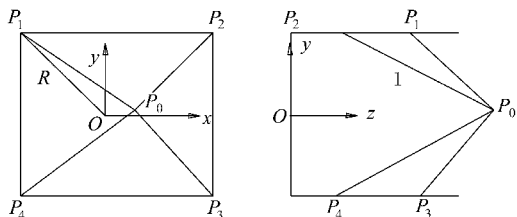


图 5 冗余并联机构等效结构原理图

Fig. 5 The equivalent sketch of redundant parallel manipulator

对于具有冗余并联机构动平台中心在点 $P_0 (x_0 \ y_0 \ z_0)$ 的误差。同样根据该机构的位置反解,确定 4 个滑块的位置。而动平台的误差空间应该是 4 组杆的杆长由 l 变化到 $l + e$ 时的动平台活动范围。该范围任一点 P 可表示为

$$|PP_i| = r_i \quad (i = 1, 2, 3, 4; l \leq r_i \leq l + e) \quad (2)$$

事实上该范围几何意义为:4 个球心分别为 $P_i (i = 1, 2, 3, 4)$, 半径 $l \leq r_i \leq l + e$ 球环的交集。

(3) 计算误差空间的数值方法

由于动平台的误差空间是每组杆的杆长由 l 变化到 $l + e$ 时的动平台活动范围,可以用误差空间的体积来衡量误差的大小。虽然每个球环的解析式可以写出,但采用解析法求出空间几个球环交集的体积是比较困难的。

本文采用数值方法,利用球坐标的积分形式来计算该空间的体积。

方法如下:

对工作空间内任一点 $P_0 (x_0 \ y_0 \ z_0)$, 建立球坐标系,第 1 组杆的滑块的位置 P_1 为球心, $P_1 P_0$ 为坐标中心轴,球坐标为 $P = (r \ \theta \ \phi)^T$, 其中 $l \leq r \leq l + e, 0 \leq \theta \leq \pi, 0 \leq \phi \leq 2\pi$, 该范围为第 1 杆端点的活动范围。可将该范围进行细化,用来判断该范围每一点是否是其它杆端点的活动范围内的点和计算该空间范围的体积。由于需要判断该范围内的任一点是否是其它杆端点的活动范围内的点,所以需将该点转换为原坐标系内的直角坐标。首先转化为该球坐标系下的直角坐标 $P = (r \sin \theta \cos \phi \ r \sin \theta \sin \phi \ r \cos \theta)^T$, 而该点在原坐标系下的坐标为

$$P = (x \ y \ z)^T = P_1 + RP \quad (3)$$

R 为球坐标系到原坐标系的变换矩阵

$$R = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \phi - \cos \theta \sin \phi & \sin \theta \cos \phi & \sin \theta \sin \phi \\ \cos \theta \sin \phi + \cos \theta \cos \phi & \sin \theta \sin \phi & \sin \theta \cos \phi \\ \sin \theta \cos \phi - \cos \theta \cos \phi & \sin \theta \sin \phi & \sin \theta \cos \phi \\ -\sin \theta \sin \phi + \cos \theta \cos \phi & -\sin \theta \cos \phi & \cos \theta \end{bmatrix}$$

式中: θ 和 ϕ 是坐标变换中的欧拉角。

判断该 P 点是否在所求空间内的条件为

$$l \leq |PP_i| \leq l + e (i = 2, 3, 4) \quad (4)$$

如 P 点符合在其它杆的活动范围的条件,则在该点处体积单元的大小为

$$V = r \times r \times \sin \theta \times r \times \theta \times \phi \quad (5)$$

而误差空间的总体积

$$V_{i+1} = V_i + V \quad (6)$$

4 计算实例

为了获得驱动冗余对减小并联机构因铰链间隙而引起的运动误差的影响情况,分别针对非冗余和冗余驱动两种结构形式,采用相同结构参数: $R = 422\text{mm}, l = 710\text{mm}, e = 0.12\text{mm}$ 。考察在半径为 300mm 的工作空间内每一点的误差分布情况,采用工程分析软件 Matlab 进行编程并计算。计算结果如图 6 所示。

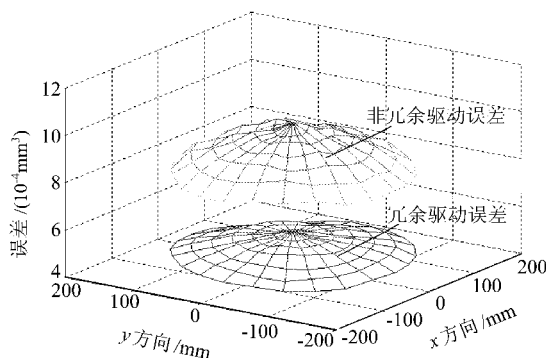


图 6 在整个工作空间范围内两种机构的误差比较

Fig. 6 The error comparison between the two mechanisms in the whole workspace

从图 6 可看出:由于铰链间隙而引起的并联机构的运动误差在工作空间中心位置最大,在工作空间的边沿最小。图 6 非冗余驱动中心最大误差约为 $1 \times 10^{-3} \text{mm}^3$, 边沿最小误差约为 $0.45 \times 10^{-3} \text{mm}^3$ 。图 6 冗余驱动中心最大误差约为 $0.5 \times 10^{-3} \text{mm}^3$, 边沿最小误差约为 $0.2 \times 10^{-3} \text{mm}^3$ 。采用驱动冗余可以明显减小机构的运动误差。

5 结 论

(1) 在分析铰链间隙对并联机构的误差影响时,可以将铰链间隙转化到杆长误差对动平台位置误差。

(2) 由于铰链间隙,动平台中心点的误差空间为空间几个球环的交集。

(3) 采用冗余驱动可以明显减小因球铰间隙而引起的并联机构的动平台的运动误差。

(4) 冗余驱动方法为提高并联机床精度提供了新的方法。

参 考 文 献

- [1] Liu G F, Wu Y L. Analysis and control of redundant parallel manipulators[A]. proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics & Automation[C]. 2001. 21 - 26.
- [2] 吴宇列,吴学忠,李圣怡. 冗余并联机构的 PD 控制[J]. 国防科技大学学报,2001,23(3):111 - 114.
(Wu Y L, Wu X Z, Li S Y. PD control of redundant parallel manipulators[J]. Changsha: National University of Defense Technology, 2001, 23(3):111 - 114.)
- [3] Duffy H J, Crane C. The optimum quality index for a redundant 4 - 8 in-parallel manipulator[A]. 7th International Sym-

posium on Advances in Robot Kinematics[C]. Piran-Portoroz, Slovenia, 2000.

- [4] Zhang Y, Duffy J. The optimum quality index for a spatial redundant 8 - 8 in-parallel manipulator. <http://cimar.me.ufl.edu/CIMAR/prbs/p88con> July 2001.

作者简介:



韩先国(1970 -)男,安徽来安人,北京航空航天大学博士生 研究方向:并联机构设计及应用研究。E-mail:hanxianguo2002@sina.com,电话 010-82317754。

陈五一(1951 -)男,河北定州人,北京航空航天大学教授,1984年在太原机械学院获硕士学位,1994年在英国伯明翰大学获博士学位,研究方向为先进加工技术与新型工艺设备。E-mail chenwuyi@public.fhnet.cn.net,电话 010-82317754。



郭卫东(1962 -)男,黑龙江拜泉人,北京航空航天大学副教授,1989年毕业于北京航空航天大学获硕士学位,1995年获博士学位。长期从事机构学、虚拟样机技术及机械原理等方面的教学和科研工作。E-mail:wduo@public.fhnet.cn.net,电话 010-82317895。

(责任编辑:蔡 斐)