基于冗余驱动的大姿态角并联机构优化设计

白志富 韩先国 陈五一

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100083)

摘 要: 分析了并联机构的姿态空间,指出了影响姿态空间的因素为物理约束和奇异约束2类,并且分别从这2个方面给出了扩大姿态空间相应的解决方案. 以3PRS(Prismatic Revolve Spherical)并联机构为例,提出了采用新的铰链形式和增加冗余UPS(Universal Prismatic Spherical)支链来增大姿态空间的方法,详细描述了动平台能够实现在各个方向90°偏转的机构设计过程,并基于遗传算法以机构整个姿态空间中的灵活度为目标对机构进行了优化. 优化的结果通过仿真证实了可靠性,这对于进一步扩大并联机构的应用范围提供参考.

关 键 词: 并联机构; 姿态空间; 冗余驱动; 优化设计

中图分类号: TP 242

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)07-0856-04

Optimal design of parallel mechanisms with large tilting ability based on redundant actuation

Bai Zhifu Han Xianguo Chen Wuyi

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

Abstract: Orientation space of parallel mechanisms was analyzed. Physical constraints and singular constraints are the two main reasons which restrict the orientation ability of parallel mechanisms. The corresponding solutions from the two aspects were presented. New joints and redundant active UPS(universal prismatic spherical) link were used to enlarge the orientation space of a 3PRS(prismatic revolve spherical) parallel mechanism. The detailed design process of this mechanism with 90° tilting ability was carried out. Genetic algorithm was used to optimize the gross dexterity of the mechanism. Computer simulation showed the effectiveness of these results, which provided references for the wide application of parallel mechanisms.

Key words: parallel mechanism; orientation space; redundant actuation; optimal design

并联机构具有结构简洁、刚度重量比大、技术附加值高等优点,但其工作空间通常都比较小,尤其是姿态空间,比如6自由度Stewart机构的动平台的偏角一般不超过30°[1],而且平动空间还随着姿态角的增大而减少,这大大限制了并联机构的应用范围. 影响并联机构姿态空间的因素包括支链运动的杆长限制、运动副转角限制和连杆干涉. 此外,奇异性是并联机构的固有属性,它的存在将本来就不大的工作空间分割成几个互不连通的区域,进一步缩小了动平台的活动能力. 为了解决上述问题,文献[2]研究了一种3自由度4驱动的平面并联机构,由于冗余驱动消除了当动平台与某支链共线时的奇异位姿,使得机构可以实现绕 z 轴360°的连续旋转. 韩国的Eclipse[3]是一种8驱动6自由度的冗余并联机构,采用冗余驱动消除了动平台在偏转30°和60°附近的2个奇异位姿,实现了动平台的90°偏转. Hexaglide[4]是采用平行的3根导轨代替一般Stewart机构的伸缩杆,这样可以有效的增加动平台在沿导轨方向的平动空间. 文献[5]从铰链结构入手,针对一种3-6式Stewart平台,以复合铰链代替普通球铰,去掉了伸缩杆结构中的套筒,增加了球铰和移动副

收稿日期: 2005-06-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50375010)

作者简介: 白志富(1979-), 男, 天津人, 博士生, zhifubai@sohu.com.

的运动范围,使得动平台可以实现±45°的偏转. 西安理工大学的 6PM2 混联机床是以 3RPS(Prismatic Revolve Spherical)机构为主体,其特点是采用斜置 45°的动平台布置形式,通过合理设计动平台上被动球铰关节的安装角,实现了机床的立卧 2 用加工[6]. 可见,采用合理的结构形式以及冗余驱动是扩大并联机构工作空间的有效措施.

本文将以 3 自由度 3PRS 并联机构为例,综合考虑采用新的铰链形式和机构方案以及冗余驱动来增大姿态空间的方法,使得动平台在 0° ~ 360°的进动角范围内都能达到章动角为 90°的偏转,扩大了这种机构的应用范围,并且该结构方案已经获得发明专利. 在此基础上,本文还以整个姿态空间中的灵活性为目标对机构的结构参数进行了优化. 计算机仿真结果表明了该方案的可靠性,这对于进一步提高并联机构的实用性提供参考.

1　3PRS 并联机构姿态空间分析

图 1 所示为典型的铰链点沿 120°对称分布的 3PRS 并联机构. 该机构的动平台具有沿 z 方向移动和绕空间两直线转动共 3 个自由度. 影响该机构姿态空间的因素有物理约束和奇异约束 2 类. 其中,物理约束是指由各运动副的运动范围和机构各部件之间的干涉形成的约束;奇异约束是指由于动平台偏转到一定姿态后发生奇异而限制了机构的继续运动. 以下分别对这 2 种约束形成的姿态空间加以分析.

本文采用搜索法计算动平台在某个高度 Z 时候的姿态能力. 具体做法是对于 0° ~360°范围内的每一个进动角,章动角从 0°开始逐渐增大,找出达到物理约束的最大角度作为章动角边界从而形成 360°范围内的章动角边界曲线. 取机构的结构参数和边界条件如表 1. 表中,R 为静平台半径,r 为动平台半径,L 为杆长,Z 为动平台高度,θ_R 和 θ_S 分别表示 R 副和 S 副的运动范围,d 表示支链干涉距离. 得出机构在 Z 取 1 000 mm 处由物理约束形成的章动角边界如图 2 所示. 图中的极角表示进动角,极径表示章动角. 对于奇异约束,考察动平台从 0°开始偏转直至出现奇异的情况,得到机构的章动角奇异曲线也见图 2.

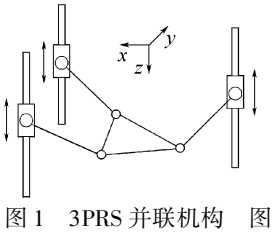


图 1　3PRS 并联机构

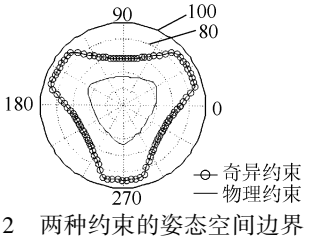


图 2　两种约束的姿态空间边界

如图 2 所示,空间并联机构的姿态空间小是物理约束和奇异约束共同作用的结果. 在本例中,球铰的运动范围是影响姿态空间的关键. 一般球铰最大只能实现 40° ~50°的偏转,这是造成许多并联机构姿态小的主要原因. 此外,奇异位形也是影响姿态能力的重要因素. 本例中,奇异约束是在物理约束之外产生的,实际上,2 者并不存在先后顺序. 因此,要增大机构的姿态空间,必须从上述 2 个方面分别加以解决.

表 1　机构参数和边界条件

参数	R/mm	r/mm	L/mm	Z/mm	θ_R/(°)	θ_S/(°)	d/mm
数值	550	340	800	1 000	5 ~ 150	0 ~ 55	30

2　增大动平台姿态空间的措施

针对上述分析的 2 个方面,本文分别给出相应的解决方案. 对于物理约束,可以从以下几点考虑:①用图 3 所示的复合结构球铰代替普通球铰. 这种复合球铰是由 3 个转动副复合而成,图中的箭头方向表示 3 个转轴方向. 其优点是摆动范围大,最大可以实现 130°的偏转. 如果设计合理的话,完全可以满足动平台偏转 90°对球铰的运动范围要求. ②采用移动副加固定杆的配置方案来代替伸缩杆. 普通的移动副可以方便实现大的移动范围,尽管伸缩杆结构也可实现大范围的杆长变化,但整个伸缩结构的尺寸将变得很大,不利于机构的设计. ③在满足运动要求的前提下,减少支链的数目有利于防止机构发生干涉而限制工作空间. 在本例中,将复合球铰安装在动平台上,采用固定杆长的 PRS 结构有利于大范围的运动,同时机构的支链少,间隔较远,不易产生干涉. 因此,机构具备了实现大姿态偏转的能力.

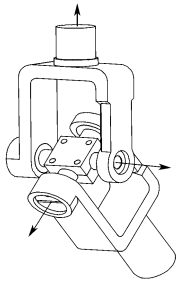


图 3　复合球铰结构

对于奇异约束,可以采用冗余驱动的方法来消除奇异. 冗余驱动是近些年人们提出的一种消除奇异,提高机构整体性能的一种有效方法. 添加的方法有 2 种:①在原有机构的基础上增加支链,新增的支链中含有驱动关节;②将机构原来的某些被动关节变为主动关节. 在本例中,是在 2 平台中心增加一个 UPS(Universal Prismatic Spherical)

支链,P为驱动副. 关于冗余驱动消除奇异的分析参见文献[7],本文主要从物理约束方面加以考虑. 经过验证可知,尽管这一冗余支链不能消除所有奇异,但可保证动平台在90°偏转范围内均不遇到奇异位形,这已能够满足本方案的设计要求.

3 可实现偏转90°的并联机构设计

经过上述分析可知,本例综合运用了上述2种增大动平台姿态能力的措施,机构具备了实现大范围偏转的能力,但能否实现各方向90°的偏转还要考虑具体的结构设计,重点考察容易出现干涉以及超出铰链运动范围的机构位姿. 在本机构的动平台上安装电主轴和切削刀具,配合一个*XY*移动工作台,其整体可用于复杂曲面的5轴加工. 因此,这里在考虑机构设计的时候,冗余球铰点要距动平台中心有一定高度 h,用于电主轴的安装,如图4所示. 根据电主轴确定 h 为150 mm. 下面要确定满足动平台在360°进动角方向实现章动角90°偏转时均不达到物理边界的机构参数,包括 r、R、L 和 Z.

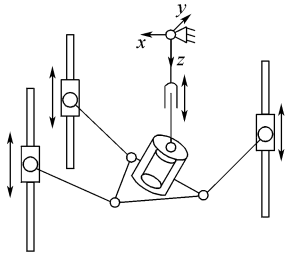


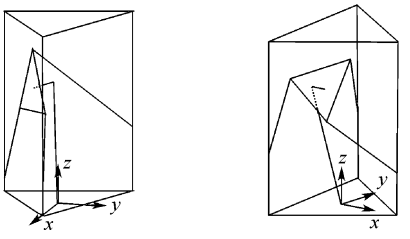
图4 并联双摆头

综合考虑这种机构的结构特点,在进行机构设计时,主要考察的物理约束有:动平台球铰的摆动范围、电主轴支架与非冗余杆干涉、冗余杆与动平台的干涉. 其余的约束条件如R副和P副的运动范围等,可通过软件仿真的方法加以验证. 重点考察2个位姿,一个是进动角 $\psi=90°$,章动角 $\theta=90°$时,动平台上球铰达到偏摆的最大值,且最容易产生冗余杆与动平台的干涉;另一个是在 $\psi=30°$,$\theta=90°$时,容易产生电主轴支架与非冗余杆的干涉,见图5. 根据机构的对称性,分别还存在着另外2组120°对称的位姿也易产生上述约束,其效果是一致的,下面只对这2种位姿进行分析.

首先确定 r 和 R 的范围. 根据动平台上电主轴支架的径向尺寸以及铰链形式,本文 r 取180 mm. 一般情况下 R 的取值为 r 的1.5~2.5倍,初步确定 R 的范围为 $R\in[350\text{ mm},450\text{ mm}]$. 考察 $\psi=30°$,$\theta=90°$时,电主轴支架与非冗余杆的干涉情况,从图6a可以看出 L 的范围为

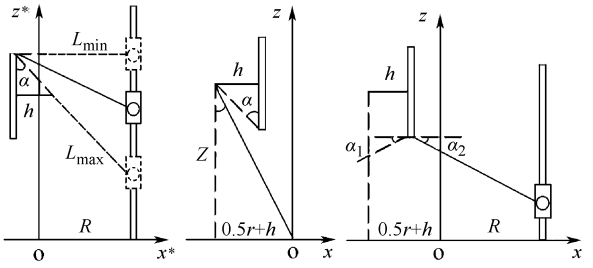
$$L_{\min} < L < L_{\max} \tag{1}$$

式中,$L_{\min}=R+\frac{r}{2}$,$L_{\max}=\frac{R+r/2}{\sin\alpha}$,$\alpha=\tan^{-1}\left(\frac{h}{r}\right)$.



a $\psi=30°,\theta=90°$ b $\psi=90°,\theta=90°$

图5 机构的接近物理边界的位姿



a $\psi=30°$ b $\psi=90°$示意1 c $\psi=90°$示意2

图6 机构的位姿约束

根据上式及 R 的范围可确定 L 的取值为 $L\in[540\text{ mm},650\text{ mm}]$. L 的上限取650 mm的原因是防止电主轴支架末端的球铰与杆发生干涉.

对于 $\psi=90°$ 的情况,如图6b所示. 此时容易产生冗余杆与动平台的干涉,由图中可知,不发生干涉的条件为 $\beta<\alpha$,即

$$Z > (h + r/2)/\tan\alpha = 288\text{ mm} \tag{2}$$

一般机床外观长宽符合黄金分割时机床比较协调,本文确定满足式(2)Z 的范围为 $Z\in[600\text{ mm},800\text{ mm}]$. 此外,在该位姿时候,球铰的摆动达到最大值,如图6c所示. 图中,α_1 表示初始位置时($\psi=\theta=0°$)杆方向与动平台法线的夹角. α_2 为该位姿时,杆与动平台法线的夹角. 由图6c可确定不超出球铰摆动范围条件为

$$180° - (\alpha_1 + \alpha_2) > 130° \tag{3}$$

即

$$\sin^{-1}\left(\frac{R - r}{L}\right) + \cos^{-1}\left(\frac{R + r/2}{L}\right) < 50° \tag{4}$$

根据 R 和 L 的范围,进一步修正 L 的取值满足 $L\in[580\text{ mm},650\text{ mm}]$. 以上确定了机构满足姿态空间的各结构参数的取值范围,下面还要确定机构的最优参数以及对机构的仿真验证.

4 以灵活性为目标的结构参数优化

机构的雅可比矩阵条件数 $c(\boldsymbol{J})$ 是衡量机构灵活性的一种常用指标,定义为矩阵最大奇异值与最小奇异值的比,是一个≥1的正数. 这个数值

越接近 1 说明机构操作性越好,越大则机构的操作性变差. 因此在设计机构时,可用此参数衡量机构的灵活性. 为了综合考虑机构在 90°姿态空间中的操作性能,定义了一个灵活度的全局指标:

$$\eta = K\sum_{i=1}^{m\cdot n}\frac{1}{c(\boldsymbol{J})}\Big/(m\cdot n) \qquad (5)$$

式(5)代表了整个 360°进动角和 90°章动角范围内条件数的均值. 取值的时候是将 360°进动角均等分为 m 份,然后每个对于每个进动角,在 0°至 90°之间等间距取 n 个章动角. 这样在整个姿态空间中共取得 $m\times n$ 个点,计算这些点条件数倒数的平均值. K 是放大系数,$K>0$. 这个指标值越大说明机构的灵活性越好.

遗传算法是解决多变量优化问题的一种有效方法,是模拟达尔文的遗传选择和自然淘汰进化过程的计算模型,基本步骤包括编码、初始种群生成、适应度评估、遗传操作等. 其中选择、交叉和变异构成了遗传算法的核心[8]. 对于本机构,需要优化的变量为 $\boldsymbol{X}=[R,L,Z]$,目标函数为 $f(\boldsymbol{X})=\max(\eta)$,其中变量的取值范围为 $R\in[350\text{ mm},450\text{ mm}]$,$L\in[580\text{ mm},650\text{ mm}]$,$Z\in[600\text{ mm},800\text{ mm}]$. 取 m,n 和 K 的取值分别为 100,100 和 1 000. 染色体的长度为 15 位,其中 R,L 和 Z 分别占 5,4 和 6 位编码. 种群的个数为 100,交叉概率为 0.8,变异概率为 0.02. 经过 25 和 50 次迭代的最优结果分别为:$\boldsymbol{X}_{25}=[356.5,636.0,609.5]$,$\boldsymbol{X}_{50}=[350.0,645.3,603.2]$.

优化后整个姿态空间内的灵活度 $c(\boldsymbol{J})$ 分布如图 7 所示,整个空间的操作性都比较好. 图 8 是 $\psi=30°$,$\theta=90°$时的机构位姿,可见机构并无干涉产生. 上述的优化结果还经过 UG Motion 的仿真验证,可以实现在整个 90°的姿态空间内无干涉和超出铰链运动范围的现象.

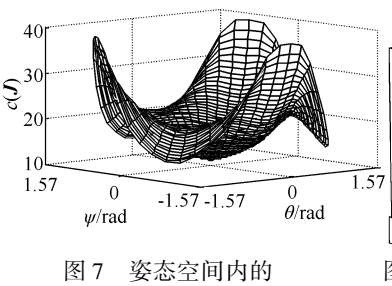


图 7　姿态空间内的条件数分布

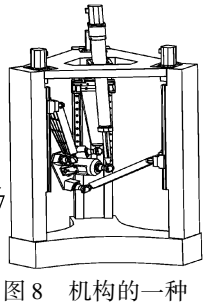


图 8　机构的一种 90°位姿

5　结 束 语

本文从物理约束和奇异约束 2 方面分析了 3PRS 并联机构的姿态空间,指出了影响这种机构姿态空间的主要因素为机构奇异和球铰的摆动范围,并且从这 2 个方面给出了相应的解决方案. 利用文中提出的几项减小物理约束影响以及增加冗余 UPS 支链的方案,本文还详细论述了可实现 90°偏转的并联机构的设计过程,并采用遗传算法进行了优化. 结果表明本文提出的冗余 3 自由度并联机构方案可以实现动平台在 360°进动角方向都能偏转 90°的效果,这对于进一步扩大并联机构的应用范围十分有利.

参考文献(References)

[1] Kim J, Hwang J C, Kim J S, et al. Eclipse-II: a new parallel mechanism enabling continuous 360 degree spinning plus three axis translational motions[C]// Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Seoul: IEEE Robotics and Automation Society, 2001:3274-3279

[2] Marquet F, Krut S, Company O, et al. ARCHI: a new redundant parallel mechanism-modeling, control and first results [C]// Proceeding of the 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Hawall: IEEE, 2001 (1):183-188

[3] Kim J, Park F, Ryu S, et al. Design and analysis of a redundantly actuated parallel mechanism for rapid machining[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2001, 17(4): 423-434

[4] Honegger M, Codourey A, Burdet E. Adaptive control of the hexaglide, a 6 dof parallel manipulator[C]// Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Albuquerque: IEEE Robotics and Automation Society, 1997:543-548

[5] 郭祖华. 并联数控刀具磨床的动力学优化设计[D]. 北京:北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 2001
Guo Zuhua. Dynamics optimization design on parallel CNC cutter grinding machine tool[D]. Beijing: School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2001(in Chinese)

[6] 高峰, 黄玉美, 樊泽民, 等. 一种六轴混合驱动数控机床的方案设计[J]. 西安理工大学学报, 2000,16(4):335-338
Gao Feng, Huang Yumei, Fan Zemin, et al. The design of a new type of 6-axis hybrid driving NC machine tool[J]. Jounal of Xi'an University of Technology, 2000,16(4):335-338(in Chinese)

[7] 白志富, 韩先国, 陈五一. 冗余驱动消除并联机构奇异研究[J]. 航空学报, 2006,27(4):733-736
Bai Zhifu, Han Xianguo, Chen Wuyi. Study on elimination singularities of parallel mechanism by actuation redundancy[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2006,27(4):733-736 (in Chinese)

[8] 杨晓钧, 王知行, 钟诗胜. 基于工作空间和灵活性的并联机床结构参数优化设计[J]. 机械与电子, 2004,2:14-17
Yang Xiaojun, Wang Zhixing, Zhong Shisheng. Parameter optimal design of parallel machine tool for workspace and dexterity [J]. Machinery & Electronics, 2004, 2: 14-17(in Chinese)

(责任编辑:陈　琛)