

新型六自由度钢带并联机器人的机构设计^{*}

祖顺江, 艾青林^{*}, 胥 芳

(浙江工业大学 特种装备制造与先进加工技术教育部重点实验室, 浙江 杭州 310014)

摘要: 为了克服传统并联机器人存在的一些共性问题, 进一步拓宽并联机器人的应用领域, 提出了一种新型的六自由度钢带并联机器人机构形式, 介绍了钢带并联机器人结构和工作原理, 阐述了钢带运动副、卷筒装置、复合球铰的结构设计与实现, 分析了钢带并联机器人的功能特点、存在问题与应用前景。研究结果表明, 弯曲圆弧截面的钢带运动副可使钢带并联机器人具有一定的承压能力, 因此钢带并联机器人兼具杆支撑并联机构和绳牵引并联机构的一些特点, 具有广泛的应用前景。

关键词: 钢带并联机器人; 钢带运动副; 卷筒装置; 圆弧截面

中图分类号: TH122; TH123; TP242

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2011)02-0157-05

Mechanism design of steel band parallel robot with six degree of freedom

ZU Shun-jiang, AI Qing-lin, XU Fang

(The Ministry of Education Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Processing Technology,
Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: A new-style steel band parallel robot with six degree of freedom was developed to overcome the common problems and broaden the application of traditional parallel robots. The structure and the working principle of steel band parallel robot, especially the design and implementation of the major parts in the parallel robot including steel band planar pair, reel device and compound spherical pair, were introduced. The functions, existing problems and applied prospect were analyzed and the conclusion that the steel band with circular arc cross-section can bear pressure loads was presented. The research results show that, steel band parallel robot involves some characteristics not only in the rod-supported parallel manipulator but also in wire-driven parallel manipulator, and possesses an extensive prospect of application.

Key words: steel band parallel robot; steel band planar pair; reel device; circular arc cross-section

0 引 言

经过数十年的探索, 并联机器人的研究已从基础理论逐渐地过渡到实践中。并联机器人可应用于: 自动化生产线、智能化医疗手术、并联机器人机床、运动模拟器、空间飞行器对接机构及其地面试验设备、卫星天线换向装置、海军舰艇观测台、天文望远镜跟踪定位系统、动感娱乐平台以及飞行器风洞试验等^[1-3]。

目前并联机器人按运动链的结构形式分为杆支撑并联机构和绳牵引并联机构两大类^[4]。杆支撑并

联机构具有结构刚性好、承载能力强、累积误差小、运动反解模型简单等优势^[5]。但其存在工作空间较小^[6]、奇异点上无法达到驱动的目的和正向运动学的计算非常复杂等问题, 为工程应用带来了很多困难。绳牵引并联机构具有结构简单、惯性小、平动工作空间大和运动速度快等特点^[7]。但由于绳只能承受拉力, 不能承受压力, 其机构必须采用冗余约束控制方案^[8], 其运动学正解分析和奇异性分析的难度比较大。并且由于其机构的控制系统是具有过约束牵引的高度耦合的非线性系统, 因此必须对动力学模型进行线性化和解耦处理。绳牵引并联机构在工程应用中还必须解决绳的弹

收稿日期: 2010-08-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50805129); 浙江省自然科学基金资助项目(Y106028)

作者简介: 祖顺江(1981-), 男, 河北保定人, 主要从事钢带并联机器人方面的研究. E-mail: zushunjiang@163.com

通信联系人: 艾青林, 男, 副教授, 硕士生导师. E-mail: aiql@zjut.edu.cn

性变形、绳长的精确控制、绳必须保持直线等关键问题。

本研究主要探讨新型六自由度钢带并联机器人的设计。

1 钢带并联机器人结构及原理

为了克服前面提到的问题和进一步拓宽并联机器人的应用领域,本研究提出了一种新型的六自由度钢带并联机器人机构,如图 1 所示。该钢带并联机器人在结构上突破了传统的杆支撑并联机构和绳牵引并联机构的结构形式。在图 1 中,每套电机座通过轴承座铰接在底座(静平台)上并可绕铰轴转动,钢带的一端可绕卷筒转动,这两个转动方向正交,其作用等价于虎克铰;钢带的另一端通过复合球铰与动平台连接。中间的支撑和传动结构为具有圆弧截面的薄钢带。六自由度钢带并联机器人机构可简化为如图 2 所示的结构形式。

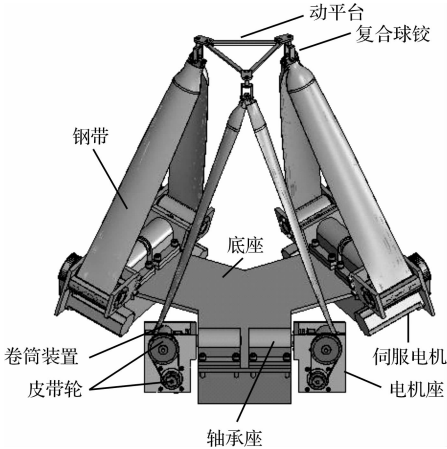


图 1 六自由度钢带并联机器人结构示意图

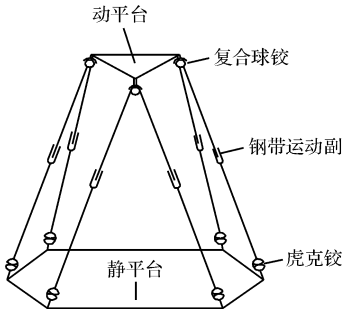


图 2 六自由度钢带并联机器人工作原理图

其工作原理是 6 套伺服电机通过皮带轮装置带动卷筒转动,卷筒再带动 6 根钢带运动并使得钢带长度发生变化,从而实现动平台的多自由度运动,如图 1 所示。

2 关键部件设计

2.1 钢带运动副

2.1.1 钢带的设计

钢带作为整个并联机器人的支撑和传动部件,在

整个机构中意义重大。下面本研究分析了各种因素影响下的单根钢带的极限载荷情况。

一定长度的单根钢带的支撑承载能力主要受钢带厚度、钢带宽度和钢带截面形状的影响。本研究中固定其他两个参数,令其中一个参数变化,来分析变化参数对钢带承受极限载荷的影响。考虑并联机器人的整体结构设计要求,笔者选取宽度为 100 mm 的钢带,分别对不同厚度和圆弧截面形状的钢带利用 ANSYS 做屈曲分析,如图 3 所示。其中,截面形状以圆弧中心角定义,如图 4 所示。

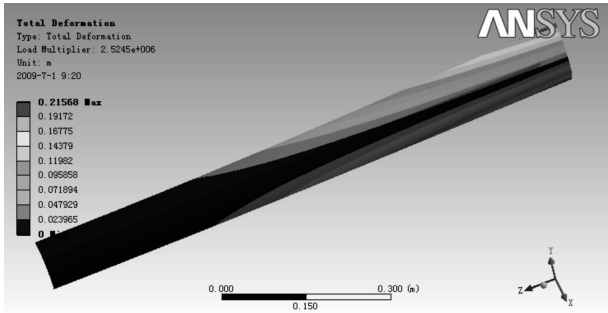


图 3 ANSYS 屈曲分析结果示意图

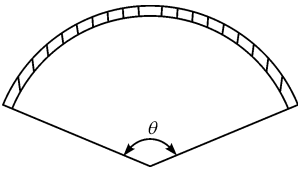


图 4 圆弧中心角定义

(1) 厚度对钢带承载能力的影响:笔者选取宽度为 100 mm,长度为 800 mm,圆弧中心角为 120°,厚度分别为 0.1 mm、0.2 mm、0.3 mm、0.4 mm 的钢带为例,通过 ANSYS 对以上几种典型的钢带做屈曲分析。仿真数据如表 1 所示。

表 1 等截面钢带受力屈曲值

厚度/mm	0.1	0.2	0.3	0.4
屈曲力值/N	95.83	297.80	503.86	734.40

由实验数据可知,钢带的承载能力随着钢带厚度的增大而增加。但是,在实际选择钢带时,厚度不能太大,否则会增加钢带缠绕的难度,同时会增大支撑结构本身的自重。钢带厚度的选择需要依据并联机器人具体的应用场合及所需负载。

(2) 截面形状对钢带承载能力的影响:笔者选取宽度为 100 mm,长度为 800 mm,厚度为 0.2 mm,圆弧中心角分别为 0°、60°、120°、180°的钢带为例做屈曲分析,分析圆弧中心角对单根钢带承载极限力的影响,仿真数据如表 2 所示。

表2 等厚度钢带受力屈曲值

圆弧中心角度/(°)	0	60	120	180
屈曲力值/N	0.08	92.35	297.8	553.95

上面的仿真数据表明,平直的钢带很容易失稳,而具有圆弧截面的钢带具有一定的承载能力。圆弧中心角越大,钢带的承载能力越高。因此需要对钢带进行特殊的处理,使其横截面保持一定的圆弧状。

另外,影响钢带承载能力的还有钢带宽度。根据力学理论,很容易得出以下结论:在具有一定的圆弧中心角的前提下,厚度一定的钢带在平直状态下宽度越大,承载能力越高。但是钢带宽度往往受到整体结构的限制,宽度太大会导致整个钢带运动副的尺寸过大。

以上是对单根钢带进行的分析,而本研究提出的钢带并联机器人是由6根组合钢带支撑动平台,承载能力会比单根钢带的承载能力大得多。

2.1.2 钢带运动副的设计

作为动平台与静平台的连接,钢带运动副是整个机器人机构中非常重要的部分,它构成机器人的支撑和动静平台传动结构。一般情况下钢带只能承受很高的拉力载荷,不能承受压力载荷,因此钢带并联机器人研究的关键问题之一是在工作空间内如何保持刚度。在本设计中,笔者采用横截面具有一定圆弧状的钢带作为钢带并联机器人的运动副,钢带经过特殊的工艺处理后,其截面保持一定的圆弧状,且钢带将受力可以直接传递到卷筒和压紧装置上。钢带运动副结构示意图如图5所示,实践证明,经过特殊处理后具有固定圆弧截面的钢带缠绕在卷筒上时,其截面形状不随卷筒形状变化,一直保持为直线形式。因此,钢带从连接片到卷筒由圆弧截面逐渐变化为直线截面,由于卷筒装置中带有钢带压紧装置,并且钢带截面由直线逐渐向圆弧形状过渡部分比较短,使得钢带过渡部分能承受较大的力。实验结果证明,由6组钢带运动副组合支撑的动平台具有一定的支撑能力。

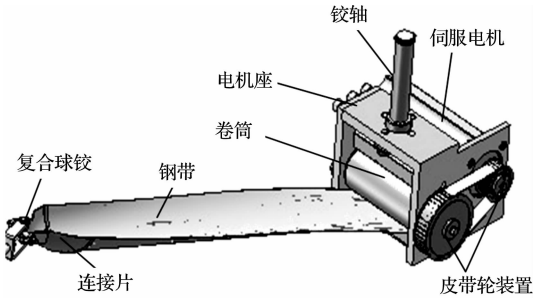


图5 钢带运动副结构示意图

由于钢带经过特殊的工艺处理之后,其刚度变得更大,同时钢带的横截面形成一定的圆弧状,这使得弯

曲变形之后的钢带恢复力更大,因此卷筒与钢带之间必须施加一定的预紧力,使其缠绕部分的层与层之间紧密接触。钢带缠绕在卷筒上,其端部与卷筒固定,缠绕完成后,通过钢带压紧装置使其固定,以避免钢带产生松散打滑现象,从而使钢带在缠绕过程中保持均匀整齐,减少了由于钢带缠绕不均匀带来的运动误差。

电机带动皮带轮装置转动,并把转动传递给卷筒;由于钢带与卷筒之间及各层钢带之间紧密接触,卷筒的转动通过静摩擦力和卷筒对钢带的拉力实现钢带的伸缩运动。钢带本身具有一定的圆弧截面,在钢带与卷筒接触的一段范围内钢带形成一个过渡,即截面由直线逐渐向圆弧形状过渡,这个过程中钢带产生一定大小的恢复力;当钢带绕卷筒方向倾斜角处于一定范围时,在恢复力及重力的作用下,钢带过渡部分与卷筒会保持一定程度的贴紧。这对伸出的钢带及动平台形成一定的支撑作用。卷筒的转动带动钢带伸缩,实现了支撑钢带的平动。

钢带移动副的形成机理与传统的杆支撑结构的移动副不同。钢带以层叠的形式缠绕在卷筒装置上,侧面投影是一条类似阿基米德曲线的形式,这样就给机器人运动控制带来了一定的困难。同时,由于钢带并不能够完全层层紧贴,尤其是最外层的钢带,可能会发生不同程度的翘曲或圆弧变形而形成非圆形状,这增加了钢带长度计算的困难。目前通过采用长度补偿法来减少钢带运动误差的影响。钢带长度的变化量可用下面公式计算:

$$l = \frac{\pi}{180} \left(\frac{a}{2} \theta^2 + \rho_0 \theta \right) + \delta \tag{1}$$

式中: a —阿基米德螺旋线系数, θ —卷筒转过的总度数, ρ_0 —卷筒旋转前钢带最外层的顶端的半径, δ —钢带长度的误差补偿量。

其中, δ 产生的主要原因是由于卷筒内的钢带预紧力不够大和钢带本身截面形状不规则。 δ 的确定要根据每根钢带的具体情况和在卷筒中发生松散的圈数和位置有关;理论上,缠绕在卷筒上的钢带产生变形和发生松散位置的所有外圈部分, δ 是一个和圈数有关的变量。但是,由于实际上影响 δ 的因素较多,需要配合实验来确定其具体的数值。

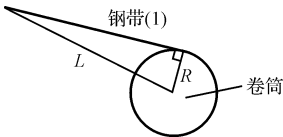


图6 钢带长度与运动模型中支撑件长度关系

如图6所示,可以得出钢带长度与理论模型中支

撑件的长度之间关系为:

$$L^2 = l^2 + R^2 \tag{2}$$

2.2 卷筒装置

卷筒是钢带的运动及动力输出装置。机器人要实现一定空间范围的运动,必须有足够长的钢带,而这一一定长度的钢带,在不使用的情况下则缠绕在卷筒装置中。由于钢带比较薄,占用空间小,所以卷筒装置体积不大。因此,卷筒装置具有节省空间、质量轻等优点。相对于杆支撑机构,缠绕的钢带的长度远远大于杆长,因而,理论上钢带并联机器人能够实现更大的工作空间。

在钢带压紧装置的作用下,钢带紧密的缠绕在卷筒上,伸出钢带所承受的力完全传递到卷筒及压紧装置上。同时,钢带压紧装置为缠绕在卷筒上的钢带提供径向压力,这有利于减小误差,伸出的钢带在承受轴向压力时,不会因产生松散而发生失稳。这种压力增大最外圈钢带与内层钢带的摩擦力,从而能够提供更大的支撑力。

卷筒装置(如图 7 所示)通过铰轴与静平台相连,形成相对转动,同时与卷筒构成轴线相交的两个转动副,形成虎克铰。由图 1 和图 7 可知,铰轴能够实现 360°范围的旋转,卷筒也能实现 360°旋转而不会发生干涉。因此,这种虎克铰比通常意义上的虎克铰^[9]具有更大的工作空间。

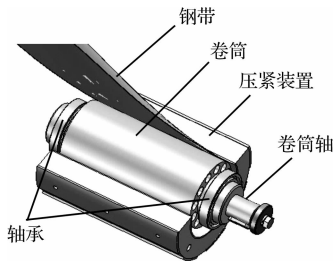


图 7 卷筒装置

虽然卷筒装置具有许多的优点,但同时也存在许多需要改进的地方:①虽然相对杆支撑结构钢带并联机构的传动机构较轻,同时结构简单,但相对于传动钢带来看,它的质量还需要进一步减轻;为了保证钢带传动和对钢带的支撑,可以寻求适合的材料,同时进行结构优化来实现;②尽量保证铰轴的延长线经过卷筒装置的重心,这样才能够保证支撑钢带不承受附加的扭力和倾覆力。

2.3 复合球铰

复合球铰是连接钢带与动平台的部件,它能够灵活地实现动平台的各种位置要求。

球铰要求两构件间形成 3 个独立的相对转动^[10]。

如图 8 所示,复合球铰机构的轴 1 与动平台通过轴承相连,能够实现相对于动平台的 360°旋转。轴 2 与旋转架通过轴承相连,实现一定角度的相对转动。轴 3 与钢带连接片相连,实现一定角度的转动。同时,3 根轴之间的运动相对独立,轴 1 与轴 2 和轴 3 之间在各自的极限运动范围下都不会产生干涉;另外,轴 2 和轴 3 之间在各自的极限运动范围内,也不会产生干涉现象。因此,本设计中的复合球铰完全满足球铰的要求。

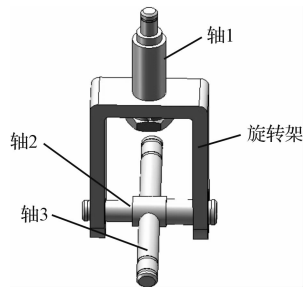


图 8 复合球铰

钢带的支撑承载能力并不高,为了增加钢带并联机器人的承载能力,需要尽量减轻钢带支撑部件的质量。因此,复合球铰在设计时,需要采用尽量简单的结构和选取密度较小的材料。同时,为了能够实现动平台的多种姿态,需要复合球铰具有一定大的转动范围及灵活性。本设计所提出的复合球铰,定位主要依赖于轴承的过盈配合,轴 2 的轴肩直径比较大,因此左右两端采用不同型号的轴承来实现轴 2 和旋转架的装配。复合球铰本身的尺寸比较小,同时在装配上提出了结构上的要求,为了保证机器人的运动精度,复合球铰需要比较高的加工精度。

3 功能与应用前景

3.1 功能

由于钢带可大范围收缩至卷筒内,并且还可以伸出很长一段距离,钢带长度变化范围非常大,因此理论上六自由度钢带并联机器人的工作空间非常大。

弯曲圆弧截面的钢带能承受一定的压力,其作用相当于可伸缩二力杆,因此钢带并联机器人具备杆支撑并联机构的刚性特点。传统的杆支撑并联机构的杆长变化范围很小,而钢带的伸缩量很大,所以钢带并联机器人的工作空间比同体积的杆支撑并联机构要大得多。由于钢带质量轻且采用机械传动结构,使得钢带并联机器人的运动速度比杆支撑并联机构快得多。与绳牵引并联机构相比,钢带并联机器人同样具备大尺度工作空间的特点。并且由于不用冗余约束控制,钢带并联机器人运动学分析和动力学分析及控制更简

单。钢带的弹性变形与绳相比可以忽略,并且钢带的长度比绳更易精确控制。

在一定的承载范围内,可以说钢带并联机构兼备了杆支撑并联机构和绳牵引并联机构的一些优点。在承载要求不高、体积和质量要求较小、运动速度要求较快的情况下,可以替代杆支撑结构。在要求定位精度高,控制策略简单的情况下,可以放弃绳牵引结构而采用钢带结构。

但是,钢带并联机构是一种新型的结构,很多的问题还需要进行深入的研究。钢带并联机器人在工作空间中依靠钢带支撑和运动,因此容易发生失稳与振动,这是目前发展钢带并联机器人技术面临的主要问题。钢带结构的支撑承载能力是限制钢带并联机构应用的一个重要的因素,如何实现钢带并联机构的较高支撑承载是一个亟待解决的问题。

3.2 应用前景

上述功能特点使得钢带并联机器人在工程中的应用具有广阔的前景。钢带并联机器人可应用于狭窄管道和深孔中的移动检测作业、水果的自动采摘等。在航天领域的应用中,其特点更明显。在失重的太空中,钢带并联机器人较大的工作空间可使得基于其工作原理设计的太空望远镜进行大范围的调焦。当宇航员离开航天器进行太空行走和作业时,其还可以将宇航员送到目的地,并对宇航员的位姿进行调整。钢带并联机器人还具有体积小、重量轻、结构紧凑的特点,非常便于航天器的运载。在医疗领域,钢带并联机构应用于医疗器械中,可以大大减轻器械的重量,便于携带实施急救;另外,钢带并联机构的调整速度快,便于快速实现机器人位姿调整与定位,加快治疗的速度。

4 结束语

(1) 本研究设计了一种新型的六自由度钢带并联机器人。该钢带并联机器人采用钢带运动副作为其驱

动方式,在运动副的结构上不同于传统的杆支撑并联机构和绳牵引并联机构,是一种全新的并联机构形式。

(2) 弯曲圆弧截面的钢带能承受一定的压力,采用这种结构作为运动副的钢带并联机器人兼具杆支撑并联机构和绳牵引并联机构的特点,具有广泛的应用前景。

(3) 钢带并联机器人在工作空间内容易发生失稳与振动,这是目前发展钢带并联机器人技术面临的主要问题。

参考文献(References):

- [1] STEWART D. A platform with 6-DOF[J]. **Proceedings on Institution of Mechanical Engineering**, 1965, 18(1): 371-386.
- [2] 李晓冬. 并联机器人的特点及应用分析[J]. 黑龙江科技信息, 2008(10): 36-37.
- [3] LIU X W, QI Y, AGYEMANG B B, et al. Design wire-driven parallel suspension system for wind tunnel based virtual flight testing[C]//Proceedings of the 7th ICFDM 2006 International Conference on Frontiers of Design and Manufacturing. Guangzhou: Guangdong University of Technology Press, 2006: 7-12.
- [4] 艾青林, 计时明, 金明生, 等. 一种六自由度钢带并联机器人机构: 中国, ZL 200610049643. 0[P]. 2008-01-09.
- [5] MERLET J P. Parallel Robots[M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [6] 胡国胜. 并联机器人的工作空间研究现状[J]. 仪器仪表用户, 2004, 11(6): 1-3.
- [7] VERHOEVEN R. Analysis of the Workspace of Tendon-based Stewart Platforms[D]. German, Duisburg: Duisburg-Essen University, 2004.
- [8] 郑亚青, 刘雄伟. 绳牵引并联机构的研究概况与发展趋势[J]. 中国机械工程, 2003, 14(9): 808-810.
- [9] 孙立宁, 于玲涛, 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.
- [10] 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. [编辑: 柴福莉]

(上接第 156 页)

- [3] KIM N H. Rotor fault detection system for inverter driven induction motors using currents signals and an encoder[J]. **Journal of Power Electronics**, 2007, 7(4): 271-277.
- [4] 牛玉广, 侯维宁. 多通道信号的同相位整周期采样[J]. 数据采集与处理, 1997, 12(2): 114-117.
- [5] 张长会, 徐宏波, 牛忠荣. 用 ADSP2181 实现旋转机械整周期采样[J]. 合肥工业大学学报, 2008, 31(4): 565-568.
- [6] 胡劲松, 杨世锡. 转子振动信号同步整周期重采样方法的研究[J]. 动力工程, 2008, 28(3): 408-410.
- [7] 任达千, 杨世锡, 吴昭同, 等. 检测键相信号周期的新方法

研究[J]. 制造业自动化, 2009, 31(3): 106-108.

- [8] 施维新, 石静波. 汽轮发电机组振动及事故[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008: 19-24.
- [9] 丁康, 谢明, 杨志坚. 离散频谱分析校正理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 111-119.
- [10] DING Kang, CAO Dang-dang, LI Wei-hua. An approach to discrete spectrum correction based on energy centroid[J]. **Key Engineering Materials**, 2006, 321-323(11): 1270-1273. [编辑: 柴福莉]