基于有限元 3-RPS 并联机床轻量化优化设计

张天明 韩先国

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院，北京 100191)

摘 要：为了减轻 3-RPS 并联机床质量，提高其刚度，分别对静平台与支链进行了结构改进.采用连接单元模拟机床中运动副，对并联机床静刚度进行有限元分析.通过分析结果获得静平台的刚度薄弱环节、支链的变形及其对机床变形的影响规律.在静平台刚度薄弱处增加抵抗变形的筋板，并通过减小其框架尺寸的方式优化静平台结构.采用悬臂梁模型分析支链的变形，以支链质量和变形乘积最小对支链进行尺寸优化.改进后的并联机床质量显著减轻，机床变形明显减小.优化结果能够提高机床动态响应性能以及机床精度.

关 键 词：轻量化；并联机床；结构优化；有限元

中图分类号：TH 122

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2010)11-1295-04

Lightweight and optimal design for 3-RPS parallel kinematic machine based on finite element method

Zhang Tianming Han Xianguo

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

Abstract: The structure of the base platform and the links were optimized in order to reduce the mass and increase the stiffness of the 3-RPS parallel kinematic machine(PKM). The static stiffness of the PKM was analyzed with finite element method, using connector in the simulation of kinematic pair. From the analysis, the parts of base platform with low stiffness were identified; the deformations of the links and how they affected the deformation of the PKM were obtained. Ribs largely resisting the deformation were added, and the frame size was reduced to optimize the base platform. Deformation of the link was calculated by using cantilever model, and the dimensions of the link were optimized by minimizing the product of mass and the deformation. After the optimization, the mass and deformation of PKM were significantly reduced. The result can greatly improve the dynamic response and accuracy of the PKM.

Key words: lightweight; parallel kinematic machine; structure optimization; finite element method

并联机床是机器人技术、数控技术、机械设计理论等学科相互结合产生的最新综合技术成果，有可能成为21世纪高速轻型数控加工的主力装备[1]，因此对并联机床进行理论研究和工程应用实践是十分必要的.国内外很多研究机构都对并联机床的运动学、力学等方面进行了深入的研究，但是目前并联机床的结构大都是设计者根据自己的经验来确定的，质量过大且静刚度不足.因此对并联机床进行轻量化设计和提高静刚度是十分重要的.

并联机床的轻量化能够提高机床动态响应性能，静刚度也是衡量并联机床性能的重要指标.文献[2]通过结构仿生优化实现了高速机床工作台的轻量化.文献[3]采用优化筋板布置方式来提高

收稿日期：2009-09-21

基金项目：航空科学基金资助项目(20081651025)；北京市重点实验室资助项目

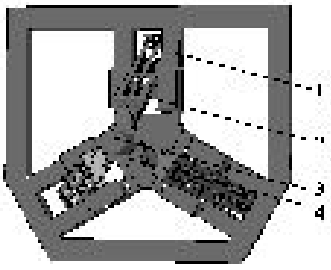
作者简介：张天明(1986－)，男，江西上饶人，硕士生，ztianming2004@126.com.

横梁刚度.但是上述方法都只对机床局部进行了优化,没有对机床整体进行分析.文献[4－6]采用有限元方法对并联机床整体的静刚度进行了分析,但是没有分析如何提高机床静刚度.

本文借助大型有限元分析软件ABAQUS,对并联机床整体进行了静刚度分析,根据分析结果对关键零部件进行结构改进,在减轻质量和提高刚度上做了一些初步探索.

1 3-RPS并联机床轻量化意义

本文研究的并联机床是基于某航空企业在飞机装配时对3-RPS并联机床的需求而设计的,并已制成实验样机.该机床样机(如图1所示)主要包括静平台、支链、动平台和负载.其中静平台质量6 500 kg,单根支链质量1 180 kg,动平台质量150 kg,机床工作时末端需要带上300 kg负载(用于飞机装配的末端执行器).总质量为6 500＋1 180×3＋150＋300＝10 490(kg).



1—静平台;2—支链(3根);3—负载;4—动平台.

图1 3-RPS并联机床

此并联机床整机放置在竖直面内 x,y 两导轨上,可在竖直面内自由移动以满足能在竖直面任何一个位置完成装配任务的要求.由于机床的总质量非常庞大,势必导致整机驱动力过大,动态响应迟钝.此外机床质量庞大还会导致支撑机床的导轨变形增大,降低机床的精度.为了使动平台获得所需的工作姿态,在每根支链末端配有伺服电机驱动支链移动,支链质量太大也会产生同样的问题.为了改善机床的动态响应性能,提高机床的精度,对其进行轻量化设计是非常有意义的.

2 原3-RPS机床有限元分析

并联机床在负载及其自重的作用下,使得支链和静平台产生变形,从而导致动平台产生细微的位姿改变,影响机床的精度.由于末端执行器采用螺钉与动平台连接,动平台的位姿改变量等同机床变形.通过有限元分析一方面可以获得静平台和支链的变形,为后面优化做准备;另一方面可得到机床的变形,以对机床精度误差进行补偿.

该并联机床每根支链有4个转动副和1个滑动副,共有转动副12个,滑动副3个.静平台与支链的变形会引起运动副之间发生相对运动,使得机床中部件产生沿运动副运动的附加位移,此位移对机床变形影响很大,对该并联机床有限元分析时必须考虑到运动副的影响.

在ABAQUS里,强大的连接单元几乎可以模拟现实中所有的运动副.对于该机床存在的两种运动副采用如下途径模拟:

1) 转动副采用基本连接器中Joint＋Revolute连接单元模拟,此连接单元的两控制点之间不允许发生相对平移,只能沿第1点的局部坐标系的 x 轴方向发生旋转.

2) 滑动副采用基本连接器中Slot＋Align连接单元模拟,此连接单元的两控制点之间不允许发生相对转动,只能沿第1点的局部坐标系的 x 轴方向发生平移.

连接器中的两控制点分别采用Coupling约束做相对运动的两个表面.即采用控制点控制一个面的运动.机床中的丝杠与螺母以及动平台与负载之间不能做相对运动,采用Tie约束它们之间接触面.

取一般工作情况(行程1.29 m,初始姿态),对静平台两侧施加完全固定边界条件(与实际工作情况相同),施加重力载荷,对原3-RPS并联机床整机有限元分析,机床变形如图2所示.

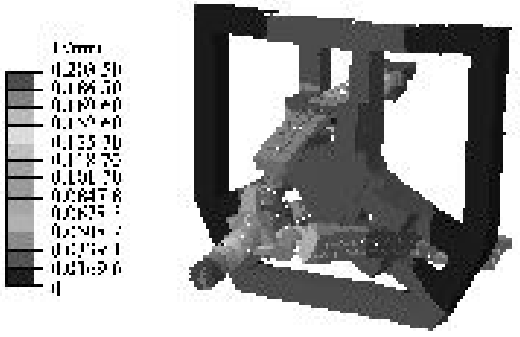


图2 原机床变形图(放大2 000倍)

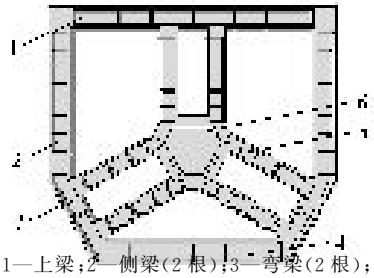
由图2可知,上支链具有拉伸变形,无侧向变形;下两侧支链既有压缩变形,又有侧向变形,且其侧向变形远大于压缩变形.有限元分析结果与支链的受力分析结果相符.机床变形大小为0.103 mm,方向竖直向下.

3 静平台轻量化优化设计

3.1 原静平台质量及其变形图

原静平台结构如图3所示,其质量总计

6 500 kg.静平台筋板的布置方式统一都是小横板布置方式,此布置方式结构简单,制造方便,但是受力性能不佳.静平台框架结构尺寸显得过大,导致静平台质量太大.



1—上梁;2—侧梁(2 根);3—弯梁(2 根);4—下梁;5—翼边(3 组);6—十字键槽.

图 3　原静平台(背面)

为了更加细致地观察静平台变形,隐藏整机分析结果中的其他零部件,只保留静平台.静平台变形如图 4 所示.静平台最大变形出现在支链在静平台的支撑处,变形方向与支撑斜面垂直,大小为 0.031 mm.

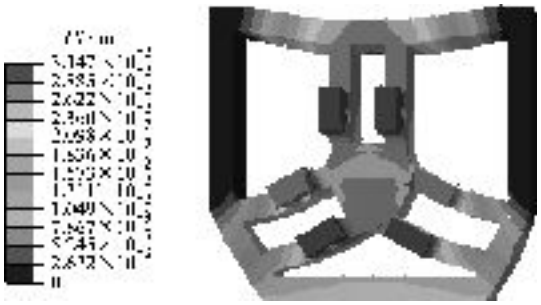


图 4　原静平台变形图(放大 8 000 倍)

3.2　静平台结构优化

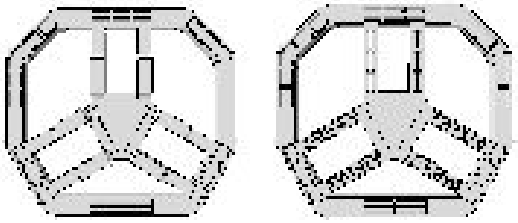
根据原静平台的变形图,找出变形大的地方,确定其主要变形方向.上梁主要变形为向下弯曲和向前弯曲;下梁变形与上梁类似.弯梁受到翼边作用,具有向外的弯曲变形.在支链作用下,上翼边具有向下变形;下两侧翼边具有弯曲变形.

沿着变形方向布置的筋板能充分发挥其抵抗变形的作用.为了减小变形,可以增加此类筋板.对于那些对变形改善甚微的筋板,应当尽可能减小其厚度,甚至删除它们.

在上梁增加竖直方向与横向的筋板,并减小静平台上梁的长度.下梁优化方法与上梁类似,在弯梁与翼边上增加方向与静平台平行的筋板.经过对静平台不断地修改分析再修改,得到最佳筋板尺寸及其布置方式.

更小的静平台半径会相应减小静平台框架尺寸,从而能减小静平台质量.根据机床使用要求,由并联机床运动学、力学分析结果,考虑到具体结构限制,原静平台半径为 0.7 m,优化后半径为 0.5 m.

修改后的静平台结构如图 5 所示,其质量减为 4 228 kg,与优化前相比静平台质量减小(6 500－4 228)/6 500×100%＝35.0%.



a　正面　　b　背面

图 5　修改后静平台

4　支链轻量化优化设计

对 3-RPS 并联机床进行力学分析,支链受力情况如图 6 所示.支链在拉力、重力、重力支反力和侧向力的共同作用下保持平衡.

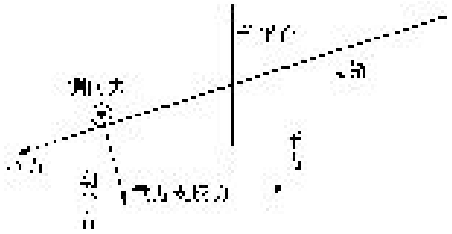


图 6　支链受力简图

在上述力的作用下,支链具有拉压变形、重力作用变形以及侧向变形.由机床整机变形图(图 2)可见,导致机床变形的主要原因是下面两支链侧向变形.由并联机床力学反解求得支链侧向力大小,把支链绕静平台转动处作为固定支撑处,采用悬臂梁模型计算支链的侧向变形量.把支链质量和侧向变形乘积 $m \cdot u$ 作为优化目标,当其取值最小时,则支链刚度与质量比值 $k/m=(F/u)/m=F/(m \cdot u)$最大,表明支链质量轻、刚度大,此时支链尺寸最优.

支链截面如图 7 所示(为了方便分析,忽略了槽内对支链侧向刚度影响不大的薄筋板),宽度 $B=350$ mm,高度 $H=100$ mm.背面有矩形槽,槽宽 b 以及槽深 h 均为优化变量.

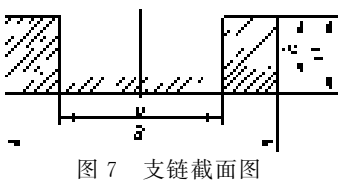


图 7　支链截面图

取 $b=190$ mm,行程 1.29 m,初始姿态,通过 MATLAB 软件研究支链的质量与侧向变形乘积

随槽深 $h(0<h<100\ \text{mm})$的变化规律.结果表明 $m\cdot u$ 随 h 的增大而减小,当 h 取不同值时仍然有相同结论.所以槽深度越大越好,由于强度限制取槽深 $h=(H-20)\text{mm}$.

取槽深 $h=100\ \text{mm}-20\ \text{mm}=80\ \text{mm}$,在不同的支链质量下,求解支链槽宽 b,并计算支链的变形量.通过上述优化方法求解得支链质量为 910 kg, $b=165\ \text{mm}$.支链优化后如图 8 所示,质量减小$(1\,180-910)/1\,180\times100\%=22.9\%$.

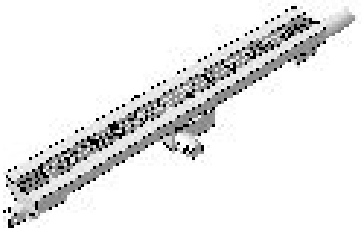


图 8 优化后支链

5 整机优化效果

静平台和支链优化后,整机质量减为 $4\,228+910\times3+150+300=7\,408$(kg),总质量减轻$(10\,490-7\,408)/10\,490\times100\%=29.4\%$.对优化后的机床进行整机有限元分析(机床的位姿、载荷、边界条件都和原机床相同),其变形如图 9 所示,机床主要变形方向竖直向下,大小为 0.080 mm,变形减小$(0.103-0.080)/0.103\times100\%=22.3\%$.

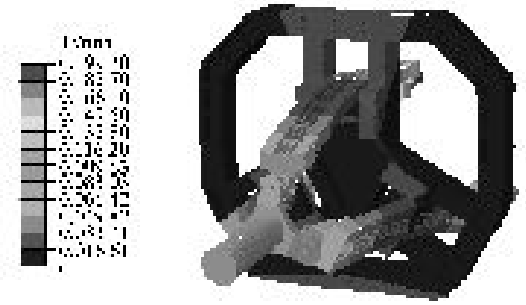


图 9 优化后机床变形图(放大 2000 倍)

6 结 论

通过上面优化,整机轻量化效果显著.静平台质量减少了 35.0%,支链质量降低 22.9%,整机质量减少了 29.4%.通过整机有限元分析,优化后机床的变形比优化前降低了 22.3%.实现了机床轻量化的同时,提高了机床的刚度,提高了机床的动态响应性能以及机床精度.

参考文献(References)

[1] 汪劲松,黄田.并联机床:机床行业面临的机遇与挑战[J].中国机械工程,1999,10(10):1103-1107
Wang Jinsong, Huang Tian. Parallel machine tool: a forthcoming opportunity and challenge to the machine tool industry [J]. China Mechanical Engineering, 1999, 10(10): 1103-1107 (in Chinese)

[2] 赵岭,陈五一,马建峰.高速机床工作台筋板的结构仿生设计[J].机械科学与技术,2008,27(7):871-875
Zhao Ling, Chen Wuyi, Ma Jianfeng. Structural bionic design of the stiffening ribs of the working table of a high-speed machine tool [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2008, 27(7): 871-875 (in Chinese)

[3] 谢黎明,李大明,沈浩,等.基于有限元分析的现场铣床横梁结构优化[J].组合机床与自动化加工技术,2008(9):37-39
Xie Liming, Li Daming, Shen Hao, et al. Optimum design of scene milling machine beam based on finite element analysis [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2008(9): 37-39 (in Chinese)

[4] Huang Tian, Zhao Xingyu, David J W. Stiffness estimation of a tripod-based parallel kinematic machine [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2002, 18(1): 50-58

[5] 李育文,张华,杨建新,等.6-UPS 并联机床静刚度的有限元分析和实验研究[J].中国机械工程,2004,15(2):112-115
Li Yuwen, Zhang Hua, Yang Jianxin, et al. Finite element analysis and experimental study for the stiffness of a 6-UPS parallel kinematic machine [J]. China Mechanical Engineering, 2004, 15(2): 112-115 (in Chinese)

[6] 刘悦,汪劲松.基于轴承及导轨接触刚度的混联机床静刚度研究及优化[J].机械工程学报,2007,43(9):151-155
Liu Yue, Wang Jinsong. Static stiffness research and optimization on a hybrid machine tool considering the stiffness of bearings and guideways [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(9): 151-155 (in Chinese)

(编 辑:文丽芳)