

新型五轴并联机床虚拟样机参数化实体建模设计*

Parameterized Solid Modeling Design for Virtual Prototype of Novel Five-Axis Parallel Machine Tool

燕山大学机械工程学院 鹿玲
山东科技大学机电学院 陈修龙

【摘要】 介绍了一种新型5自由度完全并联机床,该机床具有5个驱动分支和1个约束分支,可以实现三维移动和二维转动。根据该并联机床概念模型,对其总体布局、结构部件的参数化实体建模设计和装配过程进行了研究。设计完成的虚拟样机参数化实体模型结构合理,外形逼真,可以直接用于工程分析和设计优化,为真实机床的研制提供了有效的手段。

关键词: 并联机床 虚拟样机 参数化 实体建模

【ABSTRACT】 A novel five-degree of freedom fully parallel machine tool consisting of five actuating limbs and one passive constraint limb which can realized three-dimension and two-dimension move is proposed. The overall layout, parameterized solid modeling design of the structural components and their assembly process are studied. The designed parameterized solid model for the virtual prototype has reasonable structure and vivid shape and can be used directly for engineering analysis and design optimization, which provides effective means for manufacturing actual machine tool.

Keywords: Parallel machine tool Virtual prototype Parameterization Solid modeling

并联机床是机器人技术和机床结构技术相结合的产物,它具有刚度质量比大、环境适应性强、响应速度快、技术附加值高等特点^[1]。由于并联机床的刀具在笛卡尔坐标系中的运动是可控关节伺服运动的非线性映射,这种关系导致并联机床运动非常复杂^[2-4],只凭计算数据很难直观、准确地判断刀具的位置和姿态。

并联机床的设计一般要经过构型设计、运动学分析与尺度综合、整机详细设计及数控系统设计等4个

阶段。其中并联机床的整机详细设计阶段是并联机床结构优化设计的基础^[5-9]。由于并联机床的设计工作较传统机床更为复杂,因此用传统的二维设计是难以完成的。利用虚拟样机设计技术,可以高效准确地计算机上实现可视化的“数字机床”。在虚拟空间中,还可以对并联机床运动学仿真分析后的概念模型进行“实际”工作运动仿真,更加清晰、逼真地考察并联机床工作时运部件之间的空间位置关系,进而为整机结构优化设计以及样机性能、功能和外观等的设计提供有效手段。

本课题研究5-UPS/PRPU型并联机床虚拟样机参数化实体建模设计问题,包括整机的布局、各部分结构的详细设计和运动部件干涉检查,以建立具有合理结构和运动部件之间具有正确配合关系的5-UPS/PRPU型并联机床的虚拟样机,为进行工程分析、设计优化和最终的实际样机的试制奠定基础,并探讨了并联机床参数化实体建模和装配设计的相关问题,对其他结构形式的并联机床虚拟样机的设计也具有参考价值。

1 并联机床的机构介绍和自由度计算

1.1 并联机床的机构介绍

5-UPS/PRPU并联机床机构是一种三维移动、二维转动五轴并联机构,由动平台、定平台和连接动平台和定平台的分支等组成。动平台通过5个结构完全相同的驱动分支UPS(虎克铰—移动副—球副)以及一个约束分支PRPU(移动副—转动副—移动副—虎克铰)与定平台相连接。约束分支限制了动平台绕其自身法线的转动。通过改变5个驱动杆的杆长值,动平台可在一定范围内实现不同的位置和姿态,使安装在动平台上的刀具完成三轴至五轴的切削加工。该机构具有刚度质量比大、结构简单、动态性能好等优点,而且运动学反解十分简单,控制算法易于实现。此外,该机床与6自由度完全并联机床相比减少了一个多余的驱动轴;与采用混联机构的并联机床相比其运动惯量要小很多;机床动平台的运动约束由中间约束支链确定,动

* 河北省自然科学基金(503287)、河北省博士基金(2001216)资助项目。

平台的载荷由 5 个驱动分支和中间约束分支共同承担,机床的主要铣削力矩由中间支链承受,减小了 5 个驱动分支承受的动态力,有利于提高机床控制的动态稳定性;中间分支的位置正反解具有十分简单的解析形式,通过在该分支各关节加装传感器,可实现动平台姿态的实时检测,为实现并联机床的闭环控制提供了条件,从而可以进一步提高机床的加工精度。机床的机构示意图如图 1 所示。

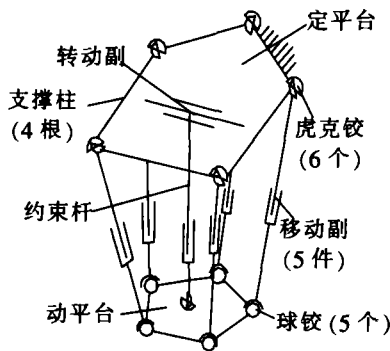


图 1 并联机床机构示意图
Fig.1 Mechanism diagram of parallel machine tool

1.2 自由度计算

本机构类似于 Stewart 平台,也属于闭环机构。自由度可以用 Kutzbach Grubler 公式来计算:

$$M=6(n-g-1)+\sum_{i=1}^k f_i, \quad (1)$$

式中, M 为机构自由度, n 为机构总构件数, g 为运动副数, f_i 为第 i 个运动副的相对自由度。由式(1)可得到本机构的自由度数为 5。

2 并联机床虚拟样机参数化实体建模

通常,实体建模有两种途径:直接利用计算机的编程语言,这种方法要求设计者掌握大量的计算机图形学知识,编程过程繁琐,开发难度较大;利用商品化的图形软件,如 AutoCAD 和 SolidWorks 等作为支撑,这种方法相对容易,开发较快,具有良好的可扩展性。

2.1 虚拟设计环境的选择

并联机床参数化实体建模要求造型设计环境具有以下基本功能:

(1)全参数化特征实体建模,以便于进行设计中的结构设计修改;

(2)运动部件的移动干涉检查;

(3)可靠的工程分析数据转换,实现在设计环境中与工程分析软件链接,结构尺寸参数等的设计更改可直接与工程分析关联,使设计和分析做到并行一致;

(4)3D 模型与 2D 工程图全关联,确保虚拟样机设计中数据的一致性。

为满足上述对并联机床的造型设计环境的要求,在完成总体设计、概念设计和尺度综合后,本课题在三维机械 CAD 软件 SolidWorks 平台下按照机床的实际尺寸,进行样机实体建模。整个建模过程采用自下而上和并行工程的建模策略,分 4 个层面完成, SolidWorks 强大的三维图形功能使实体建模方便可行。

2.2 虚拟样机的几何层次结构

利用分层结构来表示复杂形体的各个组成部分是虚拟样机技术中经常采用的实体建模方法。通过分层处理不仅可以使复杂形体建模过程简单化,同时也有助于对所建模型进行实时修改。

按照 5-UPS/PRPU 并联机床的组成结构及运动特点,将其分为静止和运动两大部分。静止部分由 1 定平台、4 根圆柱形支撑柱和 1 个工作台组成,该部分主要用于对整个并联机床的运动机构进行支撑,并保证整个系统在实际加工中的稳定性。并联机床的运动部分主要由 5 个球铰、1 个动平台、6 个虎克铰、5 根驱动杆、1 根约束杆、1 个转动副和 1 个滑块组成,这一部分的主要作用是驱动刀具在规定的运行空间内运动,以便实现对工件的加工。

2.3 虚拟样机的实体造型

根据 5-UPS/PRPU 并联机床构件的实际设计尺寸,分别对构件个体造型。分别建模的优点是:简化建模过程,便于更换或修改构件,增强模型的可扩展性。构件建模的方法是,将正方体、长方体、圆柱体和圆锥体等基本体素配置在三维空间内,通过对基本体素的和、差、积、交、并等布尔操作,描述和表达复杂物体的三维形状,并确定每个构件与相邻构件的联接点,以便装配时定位。在虚拟样机个体构件造型中,定平台、动平台、虎克铰是设计的重点。

2.3.1 定平台设计模型图

为了避免奇异,增大工作空间,在定平台上的虎克铰不是均布布置的,其中 4 个虎克铰中心位于半径为 720mm 的圆上,另外一个虎克铰中心位于半径 780mm 处。定平台的模型如图 2 所示。

2.3.2 动平台设计模型图

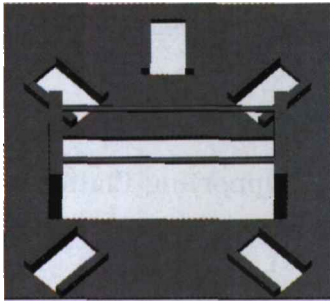


图2 定平台模型

Fig.2 Model of stationary platform

动平台是主轴电机、刀具的安装平台,是并联机床的重要工作部件。动平台的质量和体积应该尽量小,否则会增大机床的运动质量。为此我们采用的动平台为空心圆柱体结构,电主轴安装于动平台内部,这减小了动平台的尺寸,降低了机床运动过程中动平台的惯性;并且动平台上5个铰链点均匀布置。动平台的模型如图3所示。

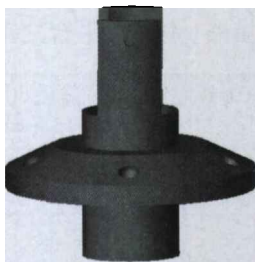


图3 动平台模型

Fig.3 Model of moveable platform

2.3.3 虎克铰设计模型图

样机的虎克铰结构采用内外环结构形式,结构简单,制造容易,精度高,摩擦损失小,动作灵活,具有更大的摆动范围,避免了干涉的出现。虎克铰的模型如图4

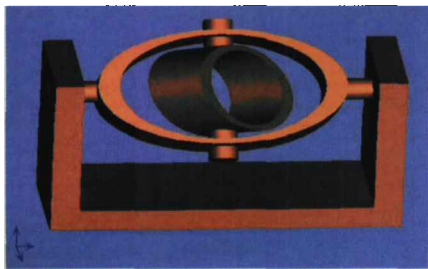


图4 虎克铰模型

Fig.4 Model of hooke joint

所示。

2.4 虚拟样机的装配与干涉检查

完成个体构件三维实体造型后,根据Team work的思想,利用三维CAD软件的自动管理文档功能实时监控样机的设计过程,并模拟机床实际装配过程进行机床零部件的装配。装配时,利用面配合、线配合、面齐平、线齐平、插入和偏距等基本操作,实现各零件间的相对装配关系,最终得到并联机床的三维整体模型。SolidWorks具有强大的实体预显功能和更加明显的控标(handle),可以不退出图形区域,直接动态单击,移动和设置特征的某些参数,并可以完成建立特征的所有操作,在建立特征的过程中就可判断建立的特征是否正确。通过对特征的动态修改,用拖曳的方式就能够实现装配体实时的设计修改,实现并联机床的参数化设计。装配流程如图5所示。

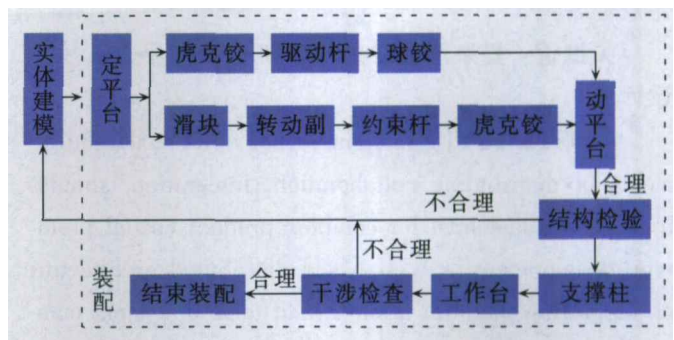


图5 虚拟样机装配流程

Fig.5 Flowchart of virtual prototype assembly

装配完成后,可以利用SolidWorks装配环境提供的移动干涉检查功能检查动平台移动时各零部件之间的碰撞情况,如果在以上的干涉检查中发现有干涉碰撞,可以在装配体中直接打开相关的构件进行编辑修改以消除干涉;否则可结束整个装配过程。

2.5 虚拟样机的形象建模

为了能在计算机窗口内更加逼真地显示出并联机床的虚拟样机,除了按上述要求准确地建立相应的三维实体模型外,还必须对所建立的模型进行形象建模。所谓形象建模就是利用SolidWorks所具有的强大的图形渲染功能对已完成的三维模型进行渲染处理,使其在色彩、材质、光照、纹理等方面都十分接近真实情况。通过对三维整体模型进行形象建模,增强虚拟样机的真实感,达到形象逼真的效果,以便评价和修改。

(下转第93页)

喷丸路径是喷丸成形的重要参数之一,准确的喷丸路径有利于壁板的成形,不良的喷丸路径会对壁板成形带来负面影响,甚至无法成形出壁板形状。研究中采用了基于极小曲率等值线的方法来设计超临界翼型壁板弦向喷丸路径。成形试验表明,结合放料喷丸以及一定的手提喷丸校形,可以成形出复杂外形壁板。

3 预应力条带喷丸成形

预应力喷丸成形是指在预应力夹具上对板件进行预先弹性弯曲,然后在板件的受拉表面进行喷丸的成形方法。试验表明,预应力喷丸可以有效地提高喷丸成形极限。ARJ21 飞机下翼面壁板厚度尺寸较大且分布不均匀,不施加预应力时,成形困难;施加预应力后,至少可使成形曲率增大 30%。研究中设计了柔性预应力夹具以适应不同尺寸、不同外形壁板喷丸成形施加预应力的需要。

4 应用情况

本研究提出的气压式条带喷丸成形技术在 ARJ21 大型超临界机翼壁板成形中的应用大致可分以下 3 个部分:(1)通过几何分析和相关计算规划喷丸路径,并得到各主要结构点上的曲率和厚度分布;(2)按条带喷丸成形基础试验数据将壁板分成若干等强度区,并确定不同区域内的初始喷丸参数;(3)按设置的初始喷丸参数首先进行最具有外形特征的局部模拟件喷丸成形试验,根据试验结果,进一步优化和改进喷丸路径和工艺参数,最后进行 1:1 全尺寸试验件喷丸成形试验。

ARJ21 飞机外翼上翼面壁板由上后壁板和上前壁板构成,材料均为 7055T7751,壁板厚度较薄,曲率变化较平缓,在自由状态下采用条带喷丸成形方法完成了成形。

ARJ21 飞机下翼面由前、中和后 3 块壁板组成,材料为 2324T39,壁板较厚,曲率变化剧烈,为提高成形能力,采用预应力夹具使壁板在弹性范围内的预弯状态下进行条带喷丸成形,获得了满足要求的壁板外形。

5 结束语

试验研究了大型壁板气动条带式数控喷丸成形技术,对大型复杂型机翼壁板提出“整体分条,单条分区”的条带式喷丸成形工艺方法,并将其应用于 ARJ21 大型超临界机翼壁板成形。成形试验和生产应用表明,气动条带式喷丸成形方法能够成形复杂型面机翼壁板。

参 考 文 献

- [1] Harburn B, Miller J C. Shot peen forming of compound contours: US, 4329862[P]. 1982.
- [2] Hornauer K P, Kohler W. Development of the peen forming process for spherical shaped components. Proceedings of the Fourth International Conference on Shot Peening, 1990: 585-594.
- [3] 尚建勤,刘学明,王超,等. 喷丸条带间隔对喷丸成形影响的试验研究. 航空制造技术, 2001(3): 44-46.
- [4] 康小明. 窄条喷丸成形的数值模拟. 航空学报, 2002, 23(1): 94-96.
- [5] 栾军. 现代试验设计优化方法. 上海: 上海交通大学出版社, 1995.
- [6] 张贤杰, 王俊彪, 王关峰. 基于特征映射的超临界机翼整体壁板坯快速建模技术研究. 机械科学与技术, 2006, 25(10): 1 209-1 211.

(责编 钟元)

(上接第 85 页)

3 结束语

在 5-UPS/PRPU 概念机模型的基础上,建立了其虚拟样机。由于样机采用真实尺寸进行实体建模,因此基于该样机模型,可非常方便地进行样机的设计优化工作。在并联机床虚拟样机的设计中,通常要进行较多的装配干涉检查和设计修改,故建议采用具备参数化功能的造型设计软件,同时还需要注意与工程分析建模设计环境之间具有直接的接口,以便于模型数据的直接转换,避免因间接转换可能造成的数据错误。

参 考 文 献

- [1] 汪劲松,李铁民,段广洪. 并联构型装备的研究进展及若干关键技术. 中国工程科学, 2002, 4(6): 63-70.
- [2] 周凯. 虚拟轴数控机床的虚实映射联动控制. 中国机械工程, 1998, 9(3): 16-18.
- [3] Romdhane L. Design and analysis of a hybrid serial-parallel manipulator. Mechanism and Machine Theory, 1999(34): 1 037-1 055.
- [4] Neugebauer R, Schwaar M, Ihlenfeldt S. New approaches to machine structures to overcome the limits of classical parallel structures. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2002, 51(1): 293-296.
- [5] 韩海生,黄田,周立,等. 虚拟环境下并联机床建模与仿真. 制造技术与机床, 2000(1): 19-20.
- [6] 冯培锋,陈扼西,江化娜,等. 基于 Pro/E 的 6-HTS 并联机床虚拟样机参数化实体建模. 工程图学学报, 2004(3): 130-33.

(责编 孟十)