

文章编号 1004-924X(2006)06-1025-07

新型并联机器人坐标测量机仿真建模的实现

陈修龙^{1,2}, 赵永生², 鹿 玲²

(1. 山东科技大学 机电学院, 山东 青岛 266510; 2. 燕山大学 机械工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 为了验证新型 5 自由度并联机器人坐标测量机的设计方案和理论模型, 缩短开发周期, 降低开发费用, 提高一次性设计成功率, 将虚拟样机技术应用于该并联机器人坐标测量机的设计开发过程。利用 SolidWorks 软件建立该型并联坐标测量机的虚拟样机模型, 应用 OLE 接口技术实现了该型并联坐标测量机的运动仿真和测量仿真, 采用 ADAMS 软件实现了该型并联坐标测量机的动力学分析和仿真, 并给出了仿真建模过程中关键问题的解决方案。计算机仿真结果证实了理论模型的正确性, 验证了设计的合理性和可靠性。为此新型并联机器人坐标测量机的结构设计和数控系统设计提供了主要参数和理论依据, 为并联坐标测量机的工程设计提供了一套有效的分析方法。

关键词: 并联机器人; 坐标测量机; 虚拟样机; 仿真建模

中图分类号: TH122 **文献标识码:** A

Research on novel parallel robot coordinate measuring machine simulation modeling

CHEN Xiu-long^{1,2}, ZHAO Yong-sheng², LU Ling²

(1. College of mechanical and electronic engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510, China;

2. College of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: In order to verify design scheme and theoretical model of a novel 5-Degrees of Freedom (DOF) parallel robot coordinate measuring machine (PRCMM), shorten the period of the PRCMM development, decrease the development costs, and enhance the ratio of its successful design, the virtual prototype technology was applied to the course of the PRCMM design and development. The virtual prototype of this PRCMM is established by mechanical design software—SolidWorks. Motion simulation and measure simulation are realized by applying OLE technology, and dynamics simulation are realized by mechanical simulation software—ADAMS. Moreover, the resolvents of key problems generated in the process of development are discussed in detail. The results of computer simulation prove that the theoretical model is correct. Furthermore, the design structure is reasonable and credible. These provide not only the theoretic foundation and main parameters for the machine design and NC design, but also an effective method for the engineering design of PRCMM on computer.

Key words: parallel robot; coordinate measuring machine; virtual prototype; simulation modeling

收稿日期: 2006-08-28; 修订日期: 2006-09-25.

基金项目: 山东科技大学机电学院青年基金资助项目

1 引言

并联机器人坐标测量机具有刚度重量比大、测头位姿灵活、测量精度高和响应速度快等优点,是一种技术附加值很高的机电产品^[1-3]。由于并联机器人坐标测量机的测头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,这种关系导致并联测量机运动非常复杂^[4-5],只凭计算数据很难直观、准确地判断测头的位置和姿态。

近年来,随着 CAD 技术、计算机仿真技术和虚拟现实技术的飞速发展,虚拟样机被越来越多的应用在产品的设计和制造过程中^[6]。虚拟样机是虚拟现实技术在工程领域的应用,它以软件造型代替物理样机,在计算机上实现可视化的数字样机^[7],以减少昂贵、费时的物理样机依赖,使研究和开发进入可预知结果的新时代。利用虚拟样机来代替物理样机对产品进行创新设计、测试与评估,可大大缩短产品的开发周期,降低研制成本,并能及时改进产品的设计质量。因此开展基于虚拟样机技术的并联机器人坐标测量机仿真建模研究十分必要。

本文以此为背景,提出了一种新型并联机器人坐标测量机的设计方案,采用 SolidWorks 造型软件实现了该并联机器人坐标测量机的虚拟样机实体建模;采用 OLE 接口技术实现了该型并联坐标测量机的测量过程仿真;采用 ADAMS 软件实现了该型并联坐标测量机的动力学仿真;详细阐述了整个开发过程和部分关键问题的解决方案。

2 新型并联机器人坐标测量机的结构和工作原理

本文所研究的并联机构是一种三维移动两维转动五自由度并联机构,由动平台、定平台和连接动平台和定平台的分支等组成。动平台通过五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。通过改变五个驱动杆的杆长值,动平台可在一定范围内实现不同的位置和姿态^[8],使安装在动平台中心的测头移

动至测点位置,然后再由安装在驱动杆上的长度测量装置(如光栅尺等)测出杆长的值,并以此为依据,计算出测点处的空间坐标,以此确定工件表面接触点的坐标值,其实质是求出并联机构的位置正解^[9]。并联机器人坐标测量机的机构简图,见图 1。

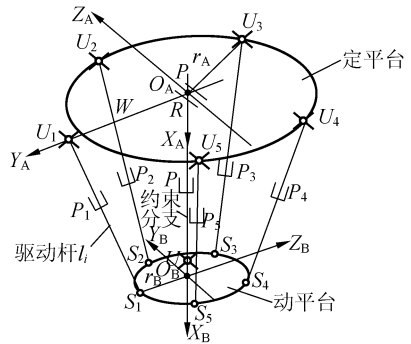


图 1 并联机器人坐标测量机的机构简图

Fig. 1 Mechanism diagram of PRCMM

3 测量机虚拟样机实体建模

实体建模有两种途径:直接利用计算机的程序语言,这种方法要求设计者掌握大量的计算机图形学知识,编程过程烦琐,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。

并联机器人坐标测量机实体模型的建立是对其仿真和分析的前提,完成总体设计、概念设计和尺度综合后,本文在三维机械 CAD 软件 SolidWorks 平台下按照测量机的实际尺寸,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,分四个层面完成。SolidWorks 强大的三维图形功能使实体建模方便可行。

3.1 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。

按照并联测量机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 个上(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测量机的运动机构进行支

撑,并保证整个系统在实际加工中的稳定性。测量机的运动部分主要由 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测头在规定的运行空间内运动,以便实现对工件的加工。

3.2 虚拟样机的实体造型

根据测量机零件的实际设计尺寸,分别对零件个体造型。分别建模的优点是:简化建模过程,便于更换或修改零件,增强模型的可扩展性。零件建模的方法是,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,并确定每个零件与相邻零件的联接点,以便装配时定位。在虚拟样机个体零件造型中定平台、动平台、虎克铰是设计的重点。

3.2.1 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,其中四个虎克铰中心位于半径为 720 mm 的圆上,另外一个虎克铰中心位于半径 780 mm 处。定平台的模型如图 2 所示。

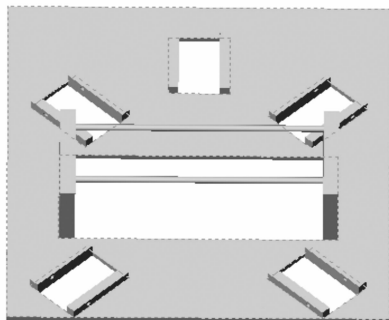


图 2 定平台模型图

Fig.2 Model of stationary platform

3.2.2 动平台设计模型图

动平台是测头的安装平台,是测量机的重要工作部件,动平台的质量和体积应该尽量小,否则会增大测量机的运动质量。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,降低了测量机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。

3.2.3 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的虎克铰,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,避免了干涉情况的出现。虎克铰的模型如图 4 所示。

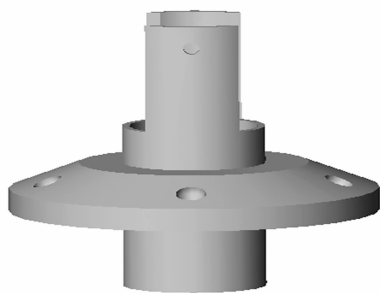


图 3 动平台模型图

Fig.3 Model of moveable platform

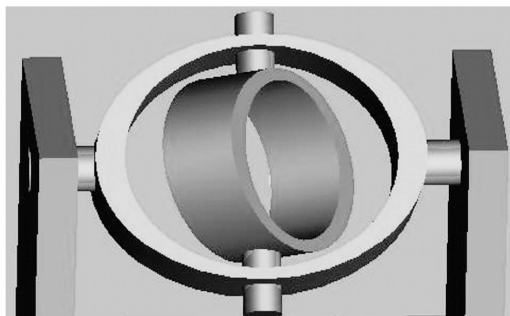


图 4 虎克铰模型图

Fig.4 Model of the hooke joint

3.3 虚拟样机的装配与干涉检查

完成单体零件三维实体造型后,根据 Teamwork 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,并模拟测量机实际装配过程进行测量机零部件的装配。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,最终得到并联测量机的三维整体模型,见图 5。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,实现并联测量机的设计。装配流程如图 6 所示。

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

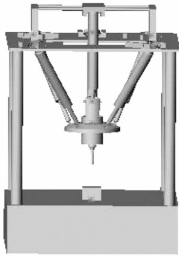


图 5 并联测量机样机模型图

Fig. 5 Model of PRCMM

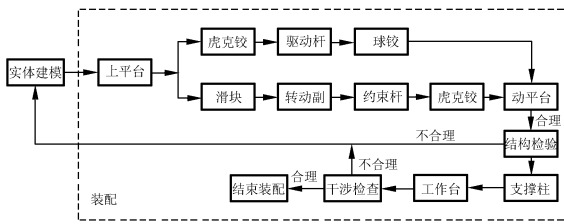


图 6 虚拟样机装配流程图

Fig. 6 Flowchart of virtual prototype assembly

发现有干涉碰撞,可以在装配体中直接打开相关的零件进行编辑修改以消除干涉部位;否则结束整个装配过程。

3.4 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测量机的虚拟样机,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,以使其在色彩、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。

4 测量机测量过程仿真

测量过程仿真是利用计算机来模拟实际的测量过程,包括运动仿真和测量仿真两部分。其目的是通过观察各铰链及各部件的相对运动状态,检验杆件之间,动平台和杆件之间是否发生干涉,校验测量机的轨迹规划结果是否正确,同时实现对零件可测量性的评价。测量运动仿真是验证测量规划程序的可靠性和预测测量过程的有效工具,可减少零件的试测,提高测量效率,从而为并

联机器人坐标测量机的运动研究、控制研究和干涉检查等打下基础。

本文通过 VB6.0 调用 SolidWorks 函数实现了并联机器人测量机测量过程仿真,具体过程:以应用程序 VB6.0 作为后台控制, SolidWorks 作为前台图形显示,将 SolidWorks 作为 VB6.0 的链接对象, VB6.0 应用程序将一定的数据处理后,调用 SolidWorks 对象的各种方法(即 API 函数),由 SolidWorks 对象将处理后的数据作为实体建模参数建立模型,从而实现实体图形的仿真显示。按照上述方法实现的仿真,其内在机制是根据运动的要求改变实体模型的内部数据,而不是传统的方法所采用的图像重画或图像覆盖等手段,因而仿真的过程不会出现模型的闪动、跳动现象,动作的连贯性好;此外也解决了用大型软件(I-DEAS、ADAMS 等)具有的机构运动仿真模块难以满足特殊的复杂轨迹仿真要求的问题^[10-11]。

4.1 测量运动仿真控制流程

首先输入期望的运动轨迹,将给定的运动轨迹离散细化后,利用已知的并联机构的反解关系,依次计算出运动轨迹所经过的各点所对应的杆长值,驱动测量机实体模型运动,并利用并联机构的位置正解关系,求出并联机器人坐标测量机测头的实际空间坐标值。以上过程不断进行,直到测头运动至测点,系统显示测点的空间坐标值。

4.2 运动仿真的实现

根据运动轨迹经过各点时所对应的驱动杆的杆长值,调用三维 CAD 软件 SolidWorks 的 API 函数把测量机各个驱动杆伸长到规定的值。由于装配约束的作用,测头在 5 个驱动杆的驱动下得到正确的位姿,实现测量机运动仿真。正在运动仿真的测量机,见图 7。

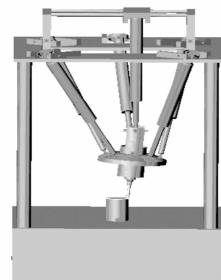


图 7 正在运动仿真的测量机

Fig. 7 Moving simulation of PRCMM

4.3 测量仿真的实现

点位测量就是给定检测方向后,控制测量机运动进行测量,接触到待测工件后,停止测量机的检测运动,并返回测量点的坐标数值。实际测量过程中检测测头是否接触到工件时,我们将测头与工件进行布尔加运算,之后检测工件的体积是否变化,若有变化则认为已经接触到工件,此时记录下测头中心的当前坐标值。

4.4 测量过程仿真的控制和状态显示

控制面板的类型采用了菜单—工具条型,并使用了分割显示技术分别对测头的位姿、驱动杆的杆长值、所用测头的信息和系统运行时间进行显示。当给定测头微小位移后,首先进行工作空间检验,再经运动学计算,获得测量机驱动杆的当前杆长和测头的当前坐标,并在状态栏显示。根据计算结果,驱动测量机样机模型仿真,同时进行干涉检验,如干涉,生成干涉报告文件。仿真完成后,使测量机恢复初始状态,以便下一次操作。

4.5 关键程序的编写

使用 SolidWorks API 之前,需要对 SolidWorks 的类库加以引用。在 VB6.0 集成环境中通过“工程—引用”菜单,选择“SolidWorks OLE Automation 1.0 Type Library”即可。以下是程序开发的部分关键代码。

.....

‘测试 SolidWorks 对象是否创建成功(VB6.0 和 SolidWorks 的接口程序)

```
Set swApp = CreateObject ("SldWorks.
Application")
```

```
If swApp Is nothing Then
MsgBox "SolidWorks 未安装或者安装
不正确"
```

```
End if
‘运动仿真程序中把 5 个驱动杆的杆长值赋予驱动杆长度变量的关键代码
```

```
Part. Parameter ("驱动杆 1"). Value =
L1Value Passed
```

```
Part. Parameter ("驱动杆 2"). Value =
L2Value Passed
```

```
Part. Parameter ("驱动杆 3"). Value =
L3Value Passed
```

```
Part. Parameter ("驱动杆 4"). Value =
L4Value Passed
```

```
Part. Parameter ("驱动杆 5"). Value =
L5Value Passed
```

‘测量仿真程序中测头与工件做布尔加运算的代码

```
Part. SelectByID "测头" X1, Y1, Z1
```

```
Part. AndSelectByID "工件" X2, Y2, Z2
```

```
Part. BooleanAdd "测头", "工件"
```

.....

5 测量机动力学仿真

并联机器人坐标测量机的动力学分析包括机构动力学模型建立、受力分析、惯性力计算、动力平衡及动力响应等方面。动力学分析在 5 自由度并联机器人坐标测量机的设计与控制中起非常重要的作用,是确定测量机主要结构参数的基础。由于并联机构的复杂性,其动力学模型是一个多自由度和多变量、高度非线性、多参数耦合的复杂系统。本文利用 SolidWorks 造型软件与 ADAMS 机械系统动力学分析软件进行数据交换,把装配后的测量机虚拟样机模型图(见“2.3 虚拟样机的装配与干涉检查”)调入到 ADAMS 环境中;应用 ADAMS 软件,根据机械系统模型,采用 Newton—Euler 方法建立系统的动力学方程并求解。

动力学仿真时,已知测头的运动求 5 个电机的驱动力,需要先确定电机输出的位移曲线,这就要求通过测点的运动路径,反解出与测头运动轨迹相对应的杆长变化曲线^[10]。在已建立的运动学分析模型中,对刀尖点施加点运动驱动,当测头按照某种曲线运动时,可以利用 ADAMS 的测量工具,测出五杆的杆长变化曲线,在 ADAMS 的后置处理器中,将得到的曲线转化成 B 样条曲线,以其作为机构动力学仿真时的驱动位移输入^[11]。解除测头运动驱动,在各驱动杆移动副添加驱动,将相应的 B 样条曲线输入,进而实现各驱动的添加。这时在测头上设置载荷,就可以进行动力学分析了。图 8 所示为测量机动平台在重力作用时,以 $v=40$ mm/s 的速度从(1 000,0,0)运动到(1 000,0,200)时 5 个分支驱动力随着时间变化的曲线图。在整个运动过程中,动平台的 α, β 角始终保持为 0° 。

由图 8 可以发现,沿 Z 轴移动时,5 个驱动力变化各自不同,初始时, f_1, f_3, f_4 为拉力, f_2, f_5

为压力。随着 Z 值的增大,驱动力 f_4 和 f_5 依不同的斜率向自己的反方向变化; f_2 和 f_3 则沿不同的斜率向驱动力数值增大的方向变化;驱动力 f_1 的变化较平缓,但数值却是最大的。

6 结 论

本文在三维 CAD 软件 SolidWorks 平台下应用 OLE 接口技术实现了该型并联机器人坐标测量机的仿真建模,模拟测量机的整个测量过程,真实地展现了测量机的各运动构件的协调运动。通过 ADAMS 软件实现了测量机的动力学分析和仿真。为实际测量机提供了结构设计参数,对特定测量过程进行了预演,避免了因干涉等原因造成不必要的经济损失。本文把并联机器人坐标测量机实体设计、建模仿真、动力学计算等几个方面的工作有机地结合起来,充分体现了虚拟样机技术的先进思想,从而大大提高了工作效率,降低了开发成本,为并联机器人坐标测量机的一次性研制成功提供了可靠保证。

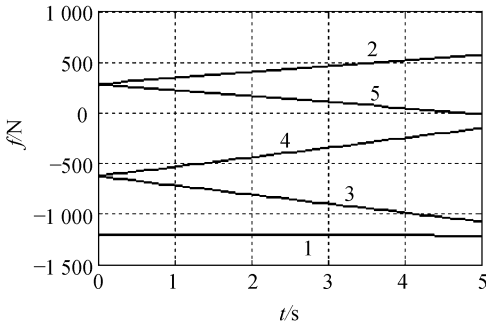


图 8 驱动力曲线

Fig. 8 Diagram of the driving force

参考文献:

- [1] 刘得军,车仁生,罗小川,等. 坐标测量机的新发展—并联运动机构坐标测量机[J]. 光学 精密工程,2000,8(5): 497-502.
LIU D J, CHE R SH, LUO X CH, *et al.* New type of CMM—parallel mechanism coordinate measuring machine [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000,8(5):497-502. (in Chinese)
- [2] TAKA AKI O. New coordinate measuring machine featuring a parallel mechanism[J]. *Int. J. of Japan Soc. for Precision Engineering*, 1997,31(3): 232-233.
- [3] HIRAKI M, YOSHIKAWA N, TAKAMASU K, *et al.* Development of 3-DOF parallel CMM[C]. *IMEKO-XV-the Fifteenth Congress of the International Measurement Confederation Measurement to Improve the Quality of Life in the 21th Century, Osaka Japan*, 1999.
- [4] 高国琴,尹小琴,马履中,等. 新型虚拟轴三坐标测量机构及其运动控制[J]. 仪器仪表学报,2006,27(1):49-53.
GAO G Q, YIN X Q, MA L ZH, *et al.* A novel virtual coordinate measuring machine and its motion control[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006,27(1):49-53. (in Chinese)
- [5] 盛忠起. 基于并联机床的测量系统设计研究[D]. 东北大学博士学位论文,2002.
SHENG ZH Q. *Design of the measurement system based on parallel machine tool*[D]. Graduate University of Northeastern University, 2002. (in Chinese)
- [6] 孟焯,车仁生,李志明. 并联六坐标测量机的虚拟样机[J]. 计算机集成制造系统,2004,10(2):215-218.
MENG ZH, CHEN R SH, LI ZH M. Virtual prototype of six-freedom-degree parallel mechanism CMM[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2004,10(2):215-218. (in Chinese)
- [7] 刘得军,车仁生,杨玉国,等. 三自由度并联机构坐标测量机构及其虚拟原型研究[J]. 中国机械工程,2000,11(3): 252-254.
LIU D J, CHE R SH, YANG Y G, *et al.* Study on the theory and the virtual prototype of 3-DOF parallel-Link CMM [J]. *China Mechanical Engineering*, 2000,11(3):252-254. (in Chinese)
- [8] 赵铁石,高英杰,杨铁林,等. 混合型四自由度并联平台机构及其位置分析[J]. 光学 精密工程,2000,8(1):42-45.
ZHAO T SH, GAO Y J, YANG T L, *et al.* A novel four-DOF mixed platform mechanism and its position analysis [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000,8(1):42-45. (in Chinese)
- [9] CHEN X L, ZHAO Y S, LU L. Research on measuring model for parallel robot coordinate measuring machine[C].

International Technology and Innovation Conference 2006 —Advanced Manufacturing Technologies, Hangzhou, China, 2006.

- [10] 郭旭伟,王知行. 基于 ADAMS 的并联机床运动学和动力学仿真[J]. 中国制造业信息化,2003,32(7):119-122.
GUO X W, WANG ZH X. Kinematics and dynamics simulation of PMT based on ADAMS [J]. *Mie of China*, 2003,32(7):119-122. (in Chinese)
- [11] 陈旭,邓亮,蔡光起. 基于虚拟样机技术的 3-UPS 并联机床仿真研究[J]. 机械与电子,2006,(7):61-63.
CHEN X, DENG L, CAI G Q. Simulation research of 3-UPS parallel machine tool based on VPT [J]. *Machinery and Electronics*, 2006,(7):61-63. (in Chinese)

作者简介:陈修龙(1976—),男,山东科技大学机电学院讲师,博士,在站博士后。主要研究方向为并联机器、CAD/CAM、数控技术的研究。E-mail:cxldy99@163.com

赵永生(1962—),男,燕山大学教授、博士,博士生导师。从事机器人技术,并联机床及数控系统研究。

鹿玲(1964—),女,燕山大学副教授、在读博士。从事并联机床及其数控系统研究。