

基于并联机构的可重构柔性夹具研究*

Research on Parallel Mechanism Based Reconfigurable Flexible Fixture

清华大学国家 CIMS 工程技术研究中心 肖姝娴 张林镗 李 惠
中航工业北京航空制造工程研究所 杜兆才

[摘要] 本文对数字化柔性装配领域中的重点问题——可重构柔性夹具设计进行研究,分别就夹具定位和夹具验证两方面的关键技术进行阐述。并针对实际需求,提出一套基于并联机构的可重构柔性夹具设计的实施技术方案,该设计方案具有模块化、智能化、通用化等特点。

关键词: 柔性装配 可重构夹具 并联机构 夹具定位布局 构件库设计

[ABSTRACT] Reconfigurable fixture design is the key issue of digital flexibly assembly. The possibility of using reconfigurable fixture device is proved by modeling of fixture position and fixture design. According to the needs of aircraft assembly, a parallel mechanism as a fixture holding device component and library-based implementation as a technical solutions is presented. The design has stiffness, flexibility, dynamic superior performance characteristics, but also has high versatility.

Keywords: Flexible assembly Reconfigurable fixture Parallel mechanism Fixture position Component library design

在机械制造的各个环节中,无论从工作量上看,还是从制造精度上看,机械装配都是制造过程中的关键环节之一,装配技术的进步推动着机械制造产业的前进。机械装配最初采用人工装配为主,由工作人员对各个部件进行铆接、焊接等操作以形成完整的装配体,但随着机械制造产业的发展,产品的批量生产、装配精度要求的提高,这种传统装配方法已经无法适应。于是研究人员提出了机械装配,减少装配过程中的人为影响,更有效地对装配精度进行计算和控制,并且还可以大幅度地提高装配效率。

数字化柔性装配是目前较为先进的机械装配方式,具有低成本、短周期、高适应性等优点,能快速应对变化的市场需求。数字化柔性装配包括装配工艺规划、柔性

工装技术、工装定位布局、仿真控制技术、测量系统等技术,是在计算机辅助设计/制造(CAD/CAM)技术、信息网络技术、装配工艺技术、自动化控制技术、仿真技术、数字化测量技术等的基础上综合发展而来,具有智能化、模块化、虚拟化等特点。数字化柔性装配系统包括用来定位和夹紧的数字化柔性工装、采用数控钻铆技术的自动连接设备、用来在线检测的激光跟踪仪,这些部件在装配数据和数控程序的协同驱动下,完成大部件的自动装配^[1]。本文研究具有灵活结构的可重构柔性工装夹具的设计,包括并联机构分析、定位布局算法研究、工装构件库设计。

1 基于并联机构的可重构柔性夹具

夹具作为装配过程中的辅助工具,在产品制造过程中不会带来直接的经济效益,但是夹具设计的合理性对装配精度、复杂度有着重大的影响。如果对于每个制造过程中的装配体都采用专用夹具,显然成本高、夹具类型繁多,因此在装配过程中使用可重构柔性夹具,在装配需求改变后可以迅速调整这种通用夹具的结构使其更好地满足装配要求,成为符合某一装配体条件的专用夹具。

O.J. Bakker 等指出了柔性夹具设计过程中的 3 个要素和 4 个阶段,其中夹具设计的 3 要素是指定位、夹持和支撑,4 个阶段是配置规划、夹具规划、夹具结构设计、夹具设计验证^[2]。夹具在装配过程中首先需要满足定位要求,就是指利用夹具将待装配零件保持在操作位置上;其次需要固联夹具与装配件,就是夹持,选择合适的夹持方式、夹持力,使工件和夹具合理受力,且在操作过程中不会发生强烈的振动和过度的形变。夹具设计研究 2 个主要方面就是夹具定位布局和夹具设计验证。

本文的研究集中在夹具定位布局以及夹具仿真验证设计等方面,研究对象以 6 足并联机构(Stewart 平台)为工件定位装置,以盒式连接(Box Joint)为夹具固定主型架。与文献[3]提出的飞机翼盒水平装配可重构夹具有所不同,文献[3]中的盒式连接安装柔性固持装置的位置只在一个平面 4 条标准梁上,如图 1 中的 $\{A_1B_1\}$,

* 国家科技支撑计划引进技术课题(2012BAH32F03)资助。

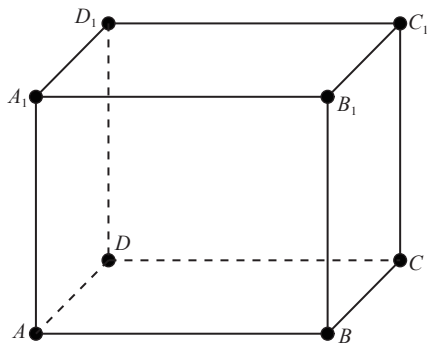


图1 盒式连接示意图
Fig.1 Diagram of box joint

$B_1C_1, C_1D_1, D_1A_1\}$,其中 $\{A_1A, B_1B, C_1C, D_1D\}$ 4条标准梁固定在地面上。本文提出盒式连接主型架在文献[3]的基础上进行改进,增加了4条标准梁 $\{AB, BC, CD, DA\}$,这样工件装配位置由图1中的长方体的顶部变化为长方体的内部,安装固持装置的位置也由原来的4条标准梁 $\{A_1B_1, B_1C_1, C_1D_1, D_1A_1\}$ 变成了长方体的12条边 $\{A_1B_1, B_1C_1, C_1D_1, D_1A_1, A_1A, B_1B, C_1C, D_1D, AB, BC, CD, DA\}$ 均能安装6足并联机构,这样在夹持装配工件时能有更多的有效定位布局方案。

2 并联机构分析

并联机构是指动平台与固定平台通过2个或2个以上独立的支链连接而成的并联驱动的闭环机构,该机构具有2个或2个以上(不超过6个)自由度,且每个支链长度可以改变,动平台的位置由所有支链长度确定。在并联机构未提出前,学者对传统的串联机构动力学运动学特性、性能分析已经有所了解,并联机构作为串联机构逻辑上的对偶机构,机构学性质也可以由串联机构对偶而来,并联机构运动学动力学逆(正)解被看成是串联机构运动学动力学正(逆)解的对偶,因此在串联机构上的研究成果可以推广到并联机构上以指导并联机构的性质研究。

图2是并联机构示意图,通过该示意图可以简要的分析一下并联机构的结构。六边形 $ABCDEF$ 表示并联机构的固定平台,在本文研究中该固定平台可以被安装固定在盒式连接的16条标准梁上的任意位置,平面 $\{A_1B_1C_1D_1E_1F_1\}$ 表示并联机构的动平台,动平台通过夹紧单元将工件与并联机构相连。六面体的6条棱 $\{A_1A, B_1B, C_1C, D_1D, E_1E, F_1F\}$ 分别表示并联机构的6条支链,这6条支链均有一个圆柱副(相对于共轴的转动副与移动副),通过该运动副可以对支链的长度进行调节。图2中的12个顶点表示的是12个虎克铰,当然也可以根据需求换成球铰等。由上述分析可以很容易的得到该并联机构有6个自由度。

图2中的6/6-Stewart并联机构是较为基础的6足并联机构,在实际使用中往往会根据实际情况进行结构优化。如可以采用复合球面副代替虎克铰或简单的球铰将上个支链连接在一个运动副上,变化为3/6-Stewart机构、3/3-Stewart机构。如果工件的位置调整不需要6个自由度,还可以减少支链个数,降低自由度,使得并联机构简化,如4-UPU机构,移去了两条支链将自由度降为4。

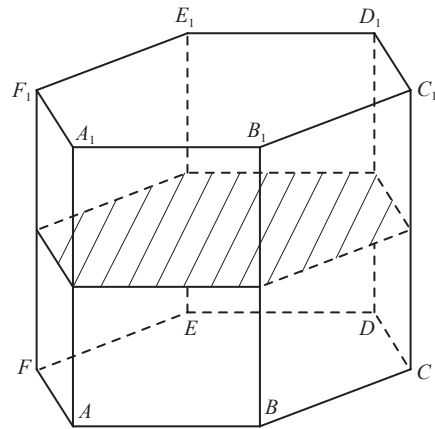


图2 并联机构示意图
Fig.2 Diagram of parallel mechanism

2.1 自由度分析

在工件装配过程中,工件必须有确定的运动,并联机构锁死时,工件必须保持在确定的位置,才能使装配操作精确地完成。达到上述要求必须满足一个基本的条件,就是机构输入的数目要与自身自由度相一致。因此需要了解机构的自由度分析方法。

一个不受任何约束的独立的构件具有6个自由度,以空间坐标系来说,可以沿 X, Y, Z 轴移动,还可以绕 X, Y, Z 轴转动。在自由度求解方面有一个简单的得到机构自由度的方法,即修正的Kutzbach-Grübler公式:

$$M = d(n - g - 1) + \sum_{i=1}^g f_i + v - s \quad (1)$$

其中, M 表示机构自由度, d 表示机构的阶数, n 表示完全不受约束的构件数, g 表示机构中的运动副个数, f_i 表示第 i 个运动副所对应的自由度数, v 表示冗余约束的数目, s 表示机构中存在的局部自由度。

通过式(1)可以得到机构自由度解,应用该公式求解6/6-SPS并联机构的自由度。机构中有6条支链,1个动平台构件,另外固定平台被安装在主型架上因此不应将该平台算入构件数 n 中,即 $n=7$;机构中有12个球面副、6个圆柱副,即 $g=18$;球面副的自由度为3,圆柱副自由度为2,即 $\sum_{i=1}^g f_i$;机构中没有冗余约束,即 $v=0$;

机构中存在 6 个连杆两端均由球铰连接,这样产生 6 个不影响输出的局部自由度;综上所述,机构自由度可以容易得到,为 6。通过上面的例子可以证明使用修正的 Kutzbach—Grübler 公式可以得到机构自由度,因此在对并联机构自由度分析时可以采用这一方法。

2.2 工作空间分析

并联机构工作空间分析是判断夹具定位布局合理性和装配操作完成能力重要指标。影响工作空间的因素有以下几点:(1)杆长的限制;(2)运动副转角的限制;(3)连杆的限制^[4]。

每个连杆都有杆长限制($l_{\min} \leq l_i \leq l_{\max}$),不可能存在无限长或无限短的连杆,即动平台不能从水平位置调整到竖直位置;并联机构中连杆与平台之间的关节大多采用球面副或者万向铰,这两种运动副的转角范围在实际上都有限制,与动平台法向量、杆长均有关系($\theta_{S_{\min}} \leq \theta_s \leq \theta_{S_{\max}}, \theta_{U_{\min}} \leq \theta_u \leq \theta_{U_{\max}}$);在实际装配过程中,连杆本身有一定的半径不能等效成理想的线段,甚至与连杆的自身的半径是不能忽略的,两相邻连杆之间的运动干涉与并联机构的工作空间有密切的关系,两相邻连杆的距离至少为连杆的直径($d_i \geq D$);在对夹具定位布局建模时要考虑这些限制,将它们作为模型的约束。

3 夹具定位布局

工件的定位,是指通过固持夹具将工件的位置固定下来,且经过定位后的工件能准确稳定地满足装配需求,即根据需要使工件在自由度上得到限制。工件实现准确有效的定位对工件加工精度、加工效率、加工过程稳定性都有重要的影响,而夹具定位的依据就是定位布局算法。

3.1 夹具定位的原理

夹具定位的基本原则是 6 点定位原理,也称为 3-2-1 定位原理,该方法选取 6 个定位点完全确定工件的位置,就是限制工件的全部自由度,使工件在某位置上固定不动。该原理的主要内容是在第一基准面上确定 3 个定位点,第二基准面上确定二个定位点,第三基准面上确定一个定位点。

工件的定位基准面的选择一般遵从以下定位原则:

(1) 优先选择平面作为主定位面(第一基准面),选择零部件上窄而长的表面作为导向定位面(第二基准面),窄而短的表面作为止推定位面(第三基准面);

(2) 定位基准与设计基准一致,即满足基准重合的条件;

(3) 利用零部件表面机械加工后的孔或表面作为定位基准,或者继续沿用上道工序的定位基准。

图 3 是长方体工件的定位方案,第一基准面为长方体的下底部(平面 $ABCD$),3 个定位点位置见图 3,限制了沿 Z 轴的移动和绕 X 、 Y 轴的转动;第二基准面为长方体后表面(平面 CC_1D_1D),2 个定位点位置见图 3,限制了沿 X 轴的移动和绕 Z 轴的转动;第三基准面为右侧面(平面 BB_1C_1C),1 个定位点位置见图 3,限制了沿 Y 轴的移动。通过 6 个定位点将长方体的位置固定。

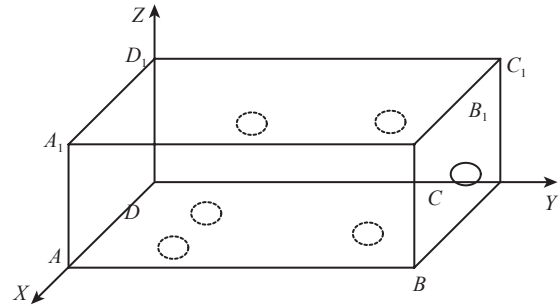


图3 长方体的定位方案
Fig.3 Fixture position of cuboid

吴玉光提出了一种扩展的 3-2-1 定位方法,使定位基准面选择不再局限于相互垂直的平面,可以选择圆柱面或平面、圆柱面相混合的侧定位面^[5]。针对薄板件加工学者们又提出了 $N-2-1$ 定位原理,对板面采用过定位方法,增加定位点以提高工件与定位装置之间的接触刚度,减少形变。

在定位点布局研究方面,不仅要考虑定位原理,还要考虑定位夹具,基于并联机构的性质,在考虑定位布局的过程中要将夹具自身所具有的自由度考虑在内。另外,根据实际情况我们还可以对 Stewart 平台进行结构优化,根据需要减少并联腿的个数,以减少定位夹具的自由度。

3.2 夹具定位算法

对于形状不规则的刚体,可以尝试采用碰撞检测问题中包围盒的算法,将复杂的几何对象用形状规则的包围盒代替,如使用图 3 中的规则长方体。这一替换方法使得复杂工件的定位问题转换为在长方体上选择定位点的简单问题。这一方法只是探索性质的猜想,可行性还有待研究。

近年来基于遗传算法、神经网络、粒子群算法等各种智能算法的夹具定位布局方案被相继提出,智能算法无疑在解决这种多目标优化问题上有着得天独厚的优势,因此智能优化算法也将是接下来算法研究的重点。初步实现方案是使用有限元分析软件 ANSYS,对支撑框架、并联夹具、工件进行分析,并且利用 ANSYS 参数化设计语言 APDL (ANSYS Parametric Design Language) 编写智能算法,搜索定位布局最优解。

为了更好地满足信息物理系统 CPS (Cyber Physical System) 中信息物理融合的要求, 强调定位性能分析的要求, 分析流程图如图 4 所示。

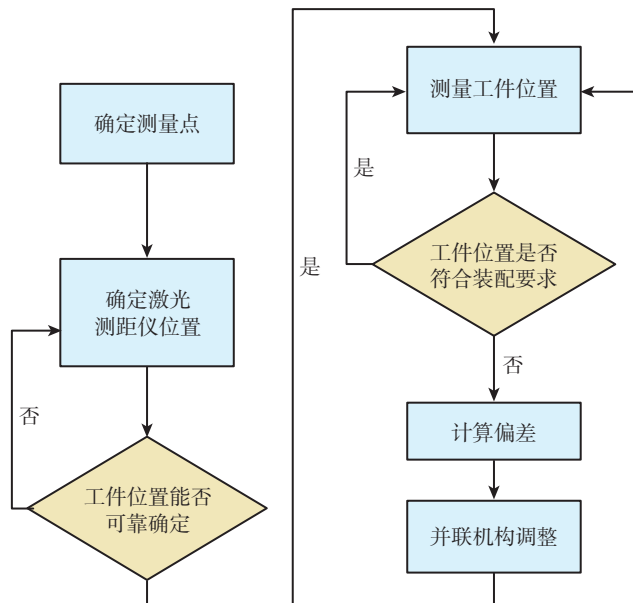


图4 定位性能分析流程图

Fig.4 Flow chart of position analysis

4 工装构件库设计

夹具初步设计完成后要对夹具设计方案进行合理性验证, 通过对夹具进行建模仿真验证夹具设计的可行性。仿真系统的通用性与构件库的丰富程度、构件库设计的合理程度有密切关系。

工装构件库的设计, 包括工装构件的属性分析与分类, 对用户视图进行整理和分析, 构件信息的存储, 数据库的有效检索。这也体现了工装构件库设计的 4 个部分: 描述、分类、存储、检索。如何准确地描述构件, 对构件有效地分类和存储, 全面快速地检索出需要的工装构件都是这一部分研究中的关键技术。

杨显刚等应用事物特征表、参数化设计等概念, 提出了基于 Inventor 平台二次开发的零部件库构建方法^[6]。该方法虽然可以利用 Inventor 里的参数化工具快速建模, 但是本文的构件库设计不适合该法, 因为文献[6]是将部件作为建模的最小单元, 而本文需要对夹具进行细分, 如主型架盒式连接标准梁尺寸、型号、材质, 并联机构关节类型、承重都需要进行详细分类。

吴雪梅介绍了基于构件的数据表单开发平台的体系结构, 在对构件的分类上采用刻面分类法, 在检索时采用普通检索和刻面检索相结合^[7]。文中所指的构件是抽象的系统特征单元, 虽然不是本文所指的工装构件

库, 但在对工装构件进行抽象后, 在分类、存储、检索上是大同小异的, 提出的复用性、封装性、组装性也体现了工装构件库的需求。

刘溪娟等提出了一种面向重构设计应用的, 采用层次化存储, 支持多视图检索的构件库技术^[8]。该方法是非常适合本文研究借鉴的方法, 可重构柔性夹具设计强调的就是可重构的设计思想, 要求夹具能够适应多种装配需求, 在需求改变时, 可以通过改变夹具结构快速调整为合适的工装夹具。在检索部分采用基于接口匹配的检索方法, 接口描述的是构件的行为, 匹配函数中使用的形参涉及与该行为有关的所有的构件属性, 因此该方法从构件行为和属性上对检索条件进行约束, 实用性强。

作者在构件库的设计过程中在借鉴前人探索成果的基础上, 拟引入软件工程的思想, 建模时采用功能分解图(FDD)的方法, 使构件库的设计更通用、更合理。

5 结论

本文对基于并联机构的可重构柔性夹具的各个方面进行了基础性研究, 重点讨论了并联机构的自由度、工作空间, 其性能参数对于可重构柔性夹具研究有着重要意义。夹具研究主要集中在夹具定位与夹具验证, 通过说明夹具定位原理与算法分析夹具定位探索的方向, 通过对夹具建模仿真进行夹具验证。本文对相关技术的解决方案进行了研究探讨与构想, 下一步的工作就是在上述探究的基础上, 设计夹具的布局算法并利用 CATIA 建立三维模型, 用 ACIS/HOOPS 平台进行仿真来验证算法的可用性。

参考文献

- [1] 袁立. 现代飞机数字化柔性装配生产线. 航空科学技术, 2011(5):1-4.
- [2] Bakker O J, Papastathis T N, Popov A A, et al. Active fixturing: literature review and future research directions. International Journal of Production Research, 2013, 51(11): 3171-3190.
- [3] 郑联语, 王艺玮, 蔡志为. 基于盒式连接和六足机构的翼盒水平装配可重构柔性夹具设计和验证初探. 航空精密制造技术, 2011, 47(3): 44-48.
- [4] 黄真, 赵永生, 赵铁石. 高等空间机构学. 北京: 高等教育出版社, 2006:158-166.
- [5] 吴光玉, 傅强. 一种扩展的 3-2-1 组合夹具定位方法. 河海大学常州分校学报, 2003, 17(4): 47-50.
- [6] 杨显刚, 何玉林, 杜静, 等. 参数化零部件库建库技术研究与实践. 图学学报, 2013, 34(2):153-158.
- [7] 吴雪梅. 面向数据表单的构件库技术的研究与实现[D]. 沈阳: 东北大学, 2005.
- [8] 刘溪娟, 蒋寿伟. 一种面向构件重用的产品构件库设计. 机械设计与制造, 2007(5):57-59.

(责编 深蓝)