DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2010.02.012

运动平台应用研究新进展

New Development of Motion Platform Application

西北工业大学机电学院　邓瑞君　秦现生　张顺琦　尤向荣

邓瑞君

硕士研究生，主要研究方向为数字装备技术、运动平台技术及并联机构。

本文综述并分析了国内外运动平台的研究成果和新进展，设计了五坐标运动平台应用于对接装配及数控钻铆，实现平台上的部件自动调整并实时测量。通过这种方法，利用 2 运动平台的联动控制，使 2 部件精确定位，自动对接装配。

运动平台可以按照需求在给定运动范围内，实现多自由度运动，达到预计位姿。在生活及工业领域应用广泛，尤其在汽车、飞机、船舶和娱乐等运动模拟方面已经成为必不可少的动态仿真设备。本文对国内外各种运动平台进行综述，试图将运动平台应用于飞机数字化装配中，以进一步提高其柔性并降低成本。

运动平台概述

通过直线移动和旋转运动的叠加可实现运动平台的多自由度运动。具有确定运动时所必须给定的独立运动参数的数目，即为了使机构的位置得以确定必须给定的独立的广义坐标的数目，称为机构的自由度。以六自由度平台为例说明自由度实现形式，3 个移动自由度分别为沿 X、Y、Z 三个方向的直线运动，3 个旋转运动分别为绕 X、Y、Z 三个轴的旋转。

运动平台结构及运动形式的种类繁多，根据不同标准可对运动平台进行不同的分类。按运动平台具有的自由度，可分为二自由度、三自由度、四自由度、五自由度、六自由度的运动平台；按运动平台的结构形式，可分为串联式和并联式 2 种；按运动平台的用途，可分为运动模拟器、精密运动平台、工业机器人、自动对接装备和机床等。

运动平台的调平是其应用的一项重要技术，目的是调整运动平台的位姿，使平台上工件某点处的法向量调整到一个确定的位置。如图 1 所示，将工件曲面上任意点 A 处的法向量调整到所需的方位，通常这个过程需要特定的调平算法经过多自由度多次联动才能实现。目前应用的调平算法有解耦法、追逐法、误差调平控制法（位置误差控制调平法、角度误差控制调平法）、四点调平、六点调平、升高低点调平法等。调平系统主要有机电调平系统和电液调平系统。另外，平台调姿是否精准决定了工件的装配质量。其调姿速度的快慢也是衡量运动平台性能的一个重要参数。

在控制驱动技术方面，主要有电

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

液伺服驱动、电气驱动和气动驱动3种方式，其中以电液伺服驱动方式最为普遍。台湾国立交通大学设计了模糊控制器，可以精确地驱动六自由度运动平台[1]；上海交通大学研究了一种适用于高速运动平台的鲁棒控制和内部模型控制相结合的控制方法[2]。

大部件对接装配运动平台

1 对接系统现状

对接系统一般应用于航空航天数字化装配中，主要有空间对接系统和飞机机翼装配系统。

空间对接机构综合试验台模拟空间两飞行器间从接触开始的对接动力学过程，并且全面考核对接机构的捕获与缓冲校正能力[3]。

文献[4]提出了飞机机身与机翼对接测控系统，如图1所示。作为飞机总装的重要部分，对装配精度提出了更高的要求。该系统综合运用了激光测量跟踪技术和测量辅助装配技术，允许柔性装配。

要实现上述系统对接装配，需要调整每个定位器使得机翼与机身的方位相吻和，但这个过程难度高、对技术人员要求高、调整时间较长。另外，这些定位器只能在某些方向上进行直线移动，限制了系统的运动自由度。最后，测量时需要多个基准点和参照点，加大了测量的不便性。同时传统的对接方式需要大量人力手动操作，难以实现自动化，影响了装配的一致性。

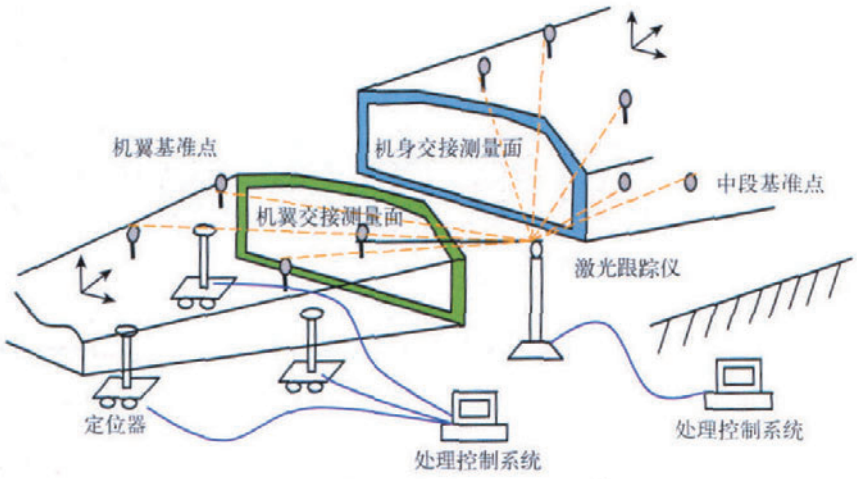

图1 机身与机翼对接的测量与控制[4]

2 对接运动平台系统

为了解决目前对接设备存在的一些不足，本文提出将运动平台应用于大部件对接系统，并应用机器视觉等非接触测量方法对工件进行位置测量，其系统原理如图2所示。非接触测量装置获取的数据经工业控制计算机计算分析后，去控制平台运动，实现运动平台自动调整位姿，使工件A与工件B的精确对接。

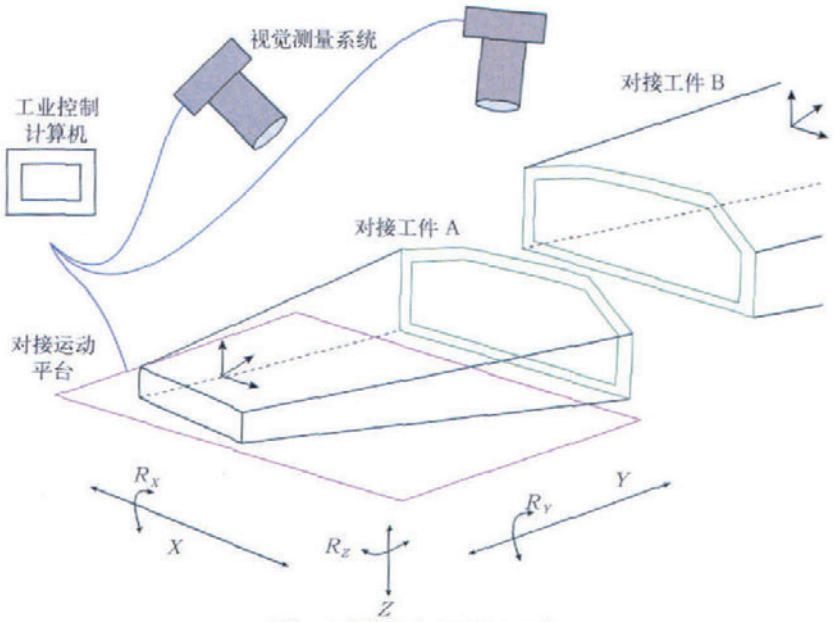

图2 大部件自动对接测量系统

3 五坐标运动平台

结合各种运动平台实现方式，设计了五坐标运动平台拟用于大部件对接装配系统，该系统由2个具有X、Y、Z三个直线自由度和2个旋转自由度的五坐标运动平台组成。Z方向运动通过2套滚珠丝杠的运动实现，当两套滚珠丝杠同步运动时，实现在Z方向的上下移动；当2套滚珠丝杠各自运动时，实现绕Y轴的旋转自由度，其结构简图如图3所示。

采用2个运动平台联动控制，对其位置进行自动测量、调姿，使平台运动到所需的精确位置，最后通过第三方装配工具（如机械手、焊枪、铆接工具等）把2个大部件进行自动对接装配。可大大减少人力，实现自动化装配。运动平台的运动轨迹控制可通过编程来实现，并且可以连续控制，同时还可进行点动、手动操作。

数控钻铆运动平台

1 GEMCOR数控钻铆系统

所设计五坐标运动平台还可用于数控钻铆系统。美国GEMCOR公司[5]生产的五坐标钻铆机G86本

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

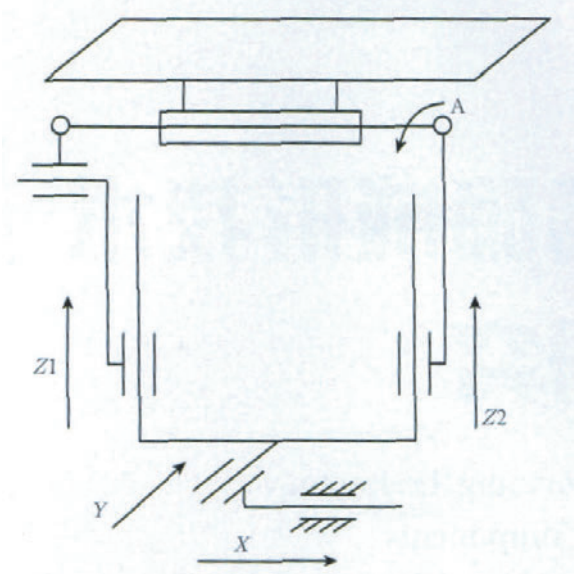

图3 五坐标运动平台机构简图

身具有2个自由度，分别是X、Y向的直线移动，放置工件的框架有3个自由度，分别是Z方向的直线移动、绕X、Y轴的转动，共同合成五自由度，但其框架旋转角度较小。并且现在国内很多飞机制造厂使用的钻铆机直接固定在地面上，对于改造成GEMCOR G86这种形式的钻铆平台具有一定难度。

钻铆机WRS具有五自由度，飞机壁板通过柔性多点工装系统将其固定，调整钻铆机的位姿即可进行钻铆。由于5个自由度集中于钻铆机本身，导致其机械结构复杂，控制难度高，成本很高，国内很少有飞机制造厂采用这种形式的钻铆机。

2 五坐标数控钻铆运动平台

针对国内一些飞机制造厂的钻铆现状，所设计五坐标运动平台可作为钻铆平台。将工件置于平台上，在平台调整好位姿后，钻铆机直接进行钻铆。其旋转角度可达±45°，比现有运动平台运动范围增大。与美国GEMCOR公司生产的五坐标钻铆机相比，该平台本身具备了五自由度，使第三方装配工具可处于固定位置，不需调整，大大降低了成本。

国内外各种运动平台

1 飞行模拟器

飞行运动模拟通常需要6个自由度模拟飞机飞行的现实环境，基于Stewart平台的六自由度运动模拟器应用最为广泛。波音747 Level D飞行模拟器[6]由美国NASA研制，用于对飞行员进行训练、测试，如图4所示。竖直运动模拟器[7]也是由美国NASA研制的，是世界上最大的竖直运动模拟器，可对飞机常规飞行状态和极端飞行状态（如急剧升降等）进行模拟，同时可以对潜在的事故进行分析优化。六足飞行模拟器[7]的缺陷是工作空间受限，其滚转、俯仰、偏航三个自由度的运动范围小。加拿大卡尔顿大学设计的三自由度运动平台[7]用于对飞机、直升机、汽车的运动模拟，同时可接受视觉和听觉信号。早在20世纪30～60年代就开发出了专门用于训练飞行员的Link 1-CA-1模拟器[8]。后来，美国研制了安装飞机座舱的F-16并联运动平台[9]、台湾国立交通大学也设计了具有3个旋转自由度的飞机模拟器[10]，以及其他公司开发的三自由度高精度飞行模拟器[11]，其中三自由度高精度飞行模拟器为轴对称结构。

图4 NASA研制的波音747飞行模拟器[7]

2 并联机床

将Stewart平台与机床技术结合，是机床结构的重大革命，并联机床的出现推动了机床的发展。第一台并联运动机床是1994年在美国芝加哥国际机床展览会上，Giddings & Lewis公司展出的Variax加工中心。六轴实现五自由度加工，体积庞大。

VERNE并联机床[12]由一个三自由度并联模块和一个两自由度回转台组成，具有五自由度。放弃了传统的刀具安装在固定主轴上的方式，而是将刀具安装在并联运动平台上，通过三条腿和固定基座连接。

空间三自由度球面并联机械[13]具有高的结构刚性和高精度的特点，可用于并联机床。

总结与展望

本文综述并分析了国内外运动平台的研究成果和新进展，设计了五坐标运动平台应用于对接装配及数控钻铆，实现平台上的部件自动调整并实时测量。通过这种方法，利用2运动平台的联动控制，使2部件精确定位，自动对接装配。不仅对运动平台的制造精度、定位精度提出更高的要求，同时对多平台联动的控制精度、非接触测量精度、信息处理速度等提出了新的挑战。

本文有参考文献13篇，由于篇幅所限未能一一列出，读者如有需要，请向本刊编辑部索取。

（责编 依然）

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net