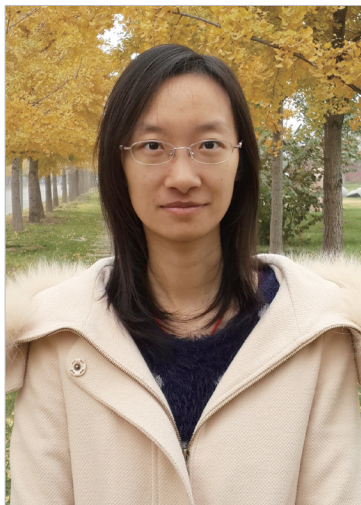


基于仿真控制的飞机大部件 对接原型系统研究*

Study on Simulation Control Based Prototype System of Aircraft Components Docking

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



李 惠

在读博士,目前在清华大学 CIMS 中心学习,主要研究方向为基于三维可视化仿真的协同控制。

柔性装配是现今飞机装配自动化发展的重要方向,其中的装配仿真技术一直在飞机装配的过程中发挥着重要的作用,能提前发现和解决实际装配中可能出现的问题,大大提高了装配效率。但是现有的装配仿真往往与实际系统难以直接结合,为解决这个问题,本文结合 CPS 的理论提出了集测量、通信、计算、仿真、控

制的 ACPS 的核心是将装配物理对象和系统的状态传递到信息系统中,基于计算、通信、控制 3C 技术集成,将信息基元与物理元素融为一体,发挥信息技术在感知、传输、存储、分析挖掘和优化控制等方面的优势,通过信息系统和物理系统之间的相互作用与反馈,在对装配过程准确认知的基础上,实现装配系统的信息沟通、系统协调和优化决策控制。

制的 ACPS(Assembly-oriented Cyber Physical Systems)。ACPS 的核心是将装配物理对象和系统的状态传递到信息系统中,基于计算、通信、控制 3C 技术集成,将信息基元与物理元素融为一体,发挥信息技术在感知、传输、存储、分析挖掘和优化控制等方面的优势,通过信息系统和物理系统之间的相互作用与反馈,在对装配过程准确认知的基础上,实现装配系统的信息沟通、系统协调和优化决策控制。本文在前期 ACPS 体系结构和飞机柔性装配三维可视化仿真研究^[1-2]已有成果的基础上,以飞机大部件对接为对象展开深入研究,设计与实现 ACPS 的基本框架,并对其中的关键技术进行讨论。

ACPS 层次结构

图 1 是 ACPS 的结构层次划分,分为 5 个层次。

(1)感知层。由若干感知节点组成,负责感知受关注的物理设备的某些物理属性,主要包括装配部件、数控定位器等装配要素的位姿、受力情况等,以及测量的原始数据经汇集节点融合后传输至信息中心。数据感知是 ACPS 通信、计算、仿真、控制和应用的基础。

(2)通信层。由若干通信基站和网络节点组成,负责将测量的原始数据传输至信息中心,以及同时要保证测量设备——服务器之间的可靠通信,飞机装配中可以采取的通信模式

* 国家国家科技支撑计划课题 (2012BAH32F03) 资助。

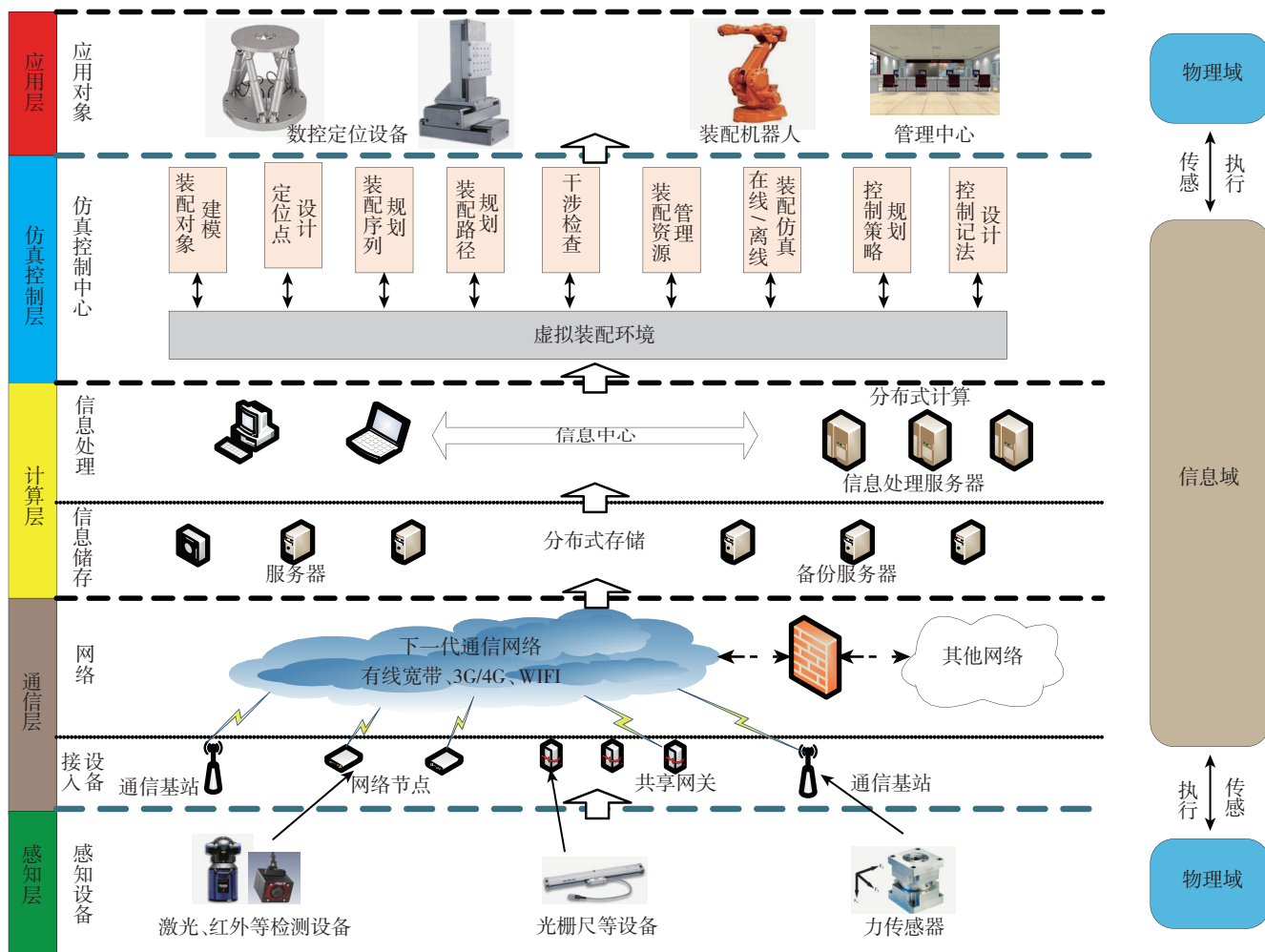


图1 ACPS层次结构

主要包括有线、无线网络、3G/4G 等。飞机装配信息系统需要获取并处理大量的设备位置、姿态、受力情况等，因此，通信层的关键问题是如何保障信息的高度可靠和有效传输。

(3) 计算层。由于 ACPS 具有海量的装配数据信息，并且飞机装配物理系统和装配信息系统之间存在相互的作用和反馈，对分析和仿真的实时性要求很高，这些都对 ACPS 计算层的计算能力和存储能力提出了挑战。因此，构建具备强大计算能力的 ACPS 平台是计算层的一个必要环节。

(4) 仿真控制。层实现 ACPS 的目标是提高对飞机装配过程的三维可视化监视能力和对飞机装配物理系统的控制能力。现有的研究多半

是仿真与控制分离的，也就是进行离线预装配仿真，在虚拟环境中进行装配对象建模、计算、仿真验证，得到装配方案之后，再人工移植到实际装配环境中去。这种装配过程仿真虽能够分析和验证飞机零部件装配运动的可实现性，但是由于仿真模型与实际系统的差异性，不能保证仿真效果与实物装配过程的一致性，制约了研究成果的应用。还有一些研究是实时监控的半实物仿真系统，但没有及时的可视化装配过程，只是提供一些指标来辅助判断装配质量，而且实际装配对象与仿真系统的互联互通互操作等问题一直没有很好的解决。仿真控制层为解决这些问题主要负责处理、分析计算层传来的数据，基于有效的装配数据，进行可重构夹具

定位设计、实时可视化飞机装配过程、跟踪设备位姿、设计科学适宜的规划/控制算法，是离/在线仿真的重要支撑。

(5) 应用层。获得飞机装配对象、数控定位器、基础工装等位姿信息后，如何为用户终端提供实时的三维可视化装配过程显示和数控设备控制决策是飞机装配发展的必然趋势，具有重要的现实意义。在 ACPS 系统中，仿真控制层设计的控制算法，在这里通过运动控制卡或其他方式来精确控制数控设备的运动，其中的难点在于如何实时处理实际装配中的不确定情况，提高装配执行的准确性和实时性，这是飞机装配信息物理系统应用于实际需要解决的一个关键问题。

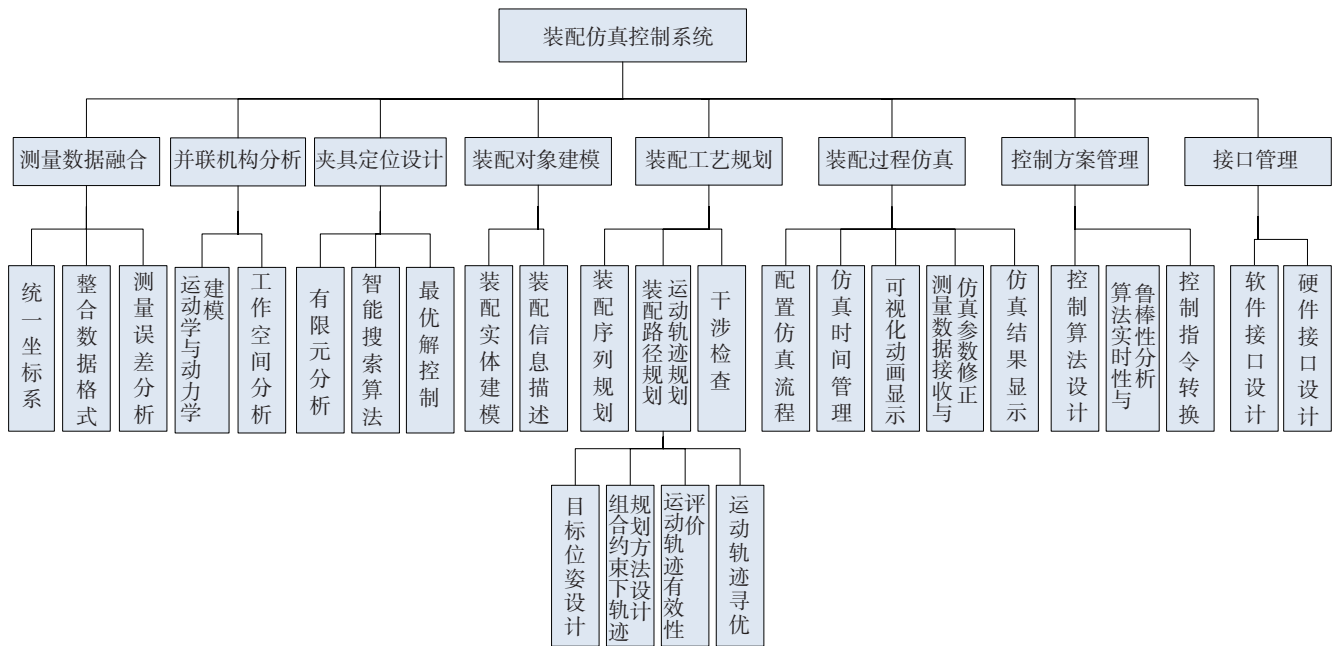


图2 原型系统功能模块

原型系统

在层次划分的基础上,以飞机大部件对接为研究对象,可进行仿真控制原型系统设计,如图2所示。

1 测量数据融合

首先,统一坐标系。通过坐标拟合计算并存储所有的转换矩阵,以期在测量数据到达时能迅速地得出测量点在全局坐标系中的位姿信息。接着,整合数据形式。不同的测量设备得到的测量数据的形式可能不同,对数据矩阵进行行列变换将数据统一成 $[x,y,z,t]$ 的形式,其中 $[x,y,z]$ 表示在三维空间的坐标, t 表示测量时间。再次,测量误差分析。对测量样本进行分析,建立准确度评价方程,分析误差的来源,找出误差补偿方法,对仪器的测量误差进行补偿,如激光跟踪仪转站误差可以通过减少仪器的位置变动来减小,最大限度保证测量的准确性。

2 并联机构分析

这里对六足并联机构^[3]进行运动学与动力学建模。然后进行运动学逆解,即已知部件的位姿求出并联机构各轴的姿态和轴上的驱动力,同

时还要工作空间分析。并联机构的工作空间就是在空间内并联机构可以到达的位置,在项目中使用多个并联机构,因此整个系统的工作空间是各个并联机构工作空间的交集。

3 夹具定位设计

利用有限元分析软件 ANSYS,在加工力、盒式连接、并联机构给定的情况下,得出加工工件、盒式连接框架等的有限元分析结果。在有限元分析后基于有限元分析结果利用智能算法求最优解,主要可以使用神经网络、遗传算法等启发式算法。夹具定位的目的是为了寻找最优的定位方案,在这种定位方案下,满足各构件的形变最小,并联机构可调节的范围达到最大,整个机构设计最为合理。

4 装配对象建模

首先,装配实体建模。这里的模型是指飞机装配过程中的工件、工装、设备的实体信息的总和,可分为几何信息(如点、线、面、空间位置以及尺寸和位置等)和物理信息(如材料、粗糙度、刚性、粘性和颜色等)。

接着进行装配信息描述,包括配合联接信息、设计约束信息、辅助语

义信息等。配合联接信息即为构成装配体的所有工件间的相互关联的信息,包括工件间的三维空间几何装配约束关系和拓扑联接关系。

5 装配工艺规划

以飞机大部件对接为研究对象,运动轨迹规划是十分重要的一步。大部件对接中运动轨迹的设计很大程度上影响了对接的准确性^[4-5],应十分重视,具体分为以下几步:

(1) 目标位姿计算。根据给定的装配基体的位置姿态信息,计算得出移动工件的目标位姿。

(2) 组合约束下轨迹规划方法设计。分为部件运动轨迹和定位机构的运动轨迹,拟采用某函数模拟部件运动轨迹,再反解定位机构各运动轴的运动轨迹。拟合函数可采用如切比雪夫三角函数、指数函数、五次多项式、梯形函数等,并计算在不同拟合函数的情况下位移、速度、加速度、驱动力、副反力的变化情况。

(3) 运动轨迹的有效性评价。即进行干涉检查,保证运动过程不受阻。

(4) 运动轨迹寻优。以多种约束条件来评价运动轨迹的优劣,如最

短时间约束、最小驱动力约束等。在仿真环境中进行运动仿真,比较多种拟合函数多种约束条件下的优劣(部件加减速情况、驱动力大小、误差等),得到最优运动轨迹。

轨迹规划之后,还要进行干涉检查。工件及装配工夹具等在运动过程中很有可能与周围环境发生碰撞、接触及其他形式的相互作用,以分级递进式算法进行动静干涉检查防止出现物体之间相互穿透和彼此重叠等不符合客观现实的现象。

6 装配过程仿真

根据规划结果设计仿真流程,可提供流程设计界面,用户填入参数后可运行一次仿真。离线仿真中主要是各模型的仿真时间的协调,在线仿真中还包括测量数据的时间与仿真时间的协调,主要通过测量数据携带的时间戳来进行时间同步,并且能在不同步时进行时间补偿。

实现可视化动画显示。实现仿真运行过程中的可视化功能,使用户能随时监控仿真进行的过程。在连接物理系统时,进行测量数据接收与仿真参数修正。测量数据用来校对仿真过程与实际装配的一致性,数据接收模块用于将测量数据转换成仿真中比对所需的形式,发现不一致后,通过必要的在线参数修正,保证装配的顺利进行。

仿真结束后,将仿真中工件与数控设备的运动轨迹、驱动力、加减速情况以图表形式呈现,并存储为下次仿真提供数据支持。

7 控制方案管理

此模块包括控制算法设计、算法实时性与鲁棒性分析。

仿真之后要为实际装配单元设计控制算法,大部件对接中涉及了多轴协同控制问题,拟比较遗传、模糊^[6]、神经网络^[7]、自适应控制,广义预测补偿算法,反馈预估补偿算法、滑模变结构控制算法等的优势,提出改进的算法实现主从、轴间同步控制。

受网络稳定性的影响,测量数据的接收会出现延迟,计算和仿真也需要一定的时间,延迟时间加上计算时间之后,实际装配的状态早已发生了改变,考虑延时、信号干扰的情况,建立延时模型^[8],引入前馈补偿等对算法进行改进^[9],保证控制的实时性和鲁棒性。

8 接口管理

软件和硬件接口设计。ACIS的仿真平台提供了CATIA、MATLAB的接口,在编程时正确调用即可。

硬件接口有两种情况,一种是连接可编程的运动控制卡,需要编写相应的硬件代码;另一种是利用商用数控设备的开放接口,也需要编写相应的软件代码。

开发流程

基于物理信息融合的思想,以飞机大部件对接为研究背景,研究对接过程中测量、仿真、控制的相关问题。系统由两部分组成,一部分是实际物理系统,一部分是仿真系统。开发流程如下:

(1)参照实际物理设备搭建飞机大部件对接过程中所需工件的CATIA模型。

(2)模型建好之后,利用ACIS提供的与CATIA的API将模型导入ACIS&HOOPS环境中,并在该环境中建立仿真控制平台,实现包括测量仿真、装配工艺仿真、控制仿真的三维数字化全过程仿真控制。测量仿真主要是模拟激光跟踪仪的测量,通过建立定位点得到测量数据发送给仿真控制平台,模拟的测量数据可进行一些加噪处理,因为实际测量中可能会有误差。装配工艺仿真在仿真控制平台中实现,即进行预装配仿真,包括固定端部件定位设计、移动端部件运动轨迹规划、碰撞干涉检查;定位设计是基于盒式连接与并联机构来计算部件的定位点,可用ANSYS来进行受力情况分

析,避免产生局部形变;运动轨迹规划是规划部件运动轨迹函数与数控定位器各定位轴的运动轨迹;碰撞干涉检查是保证按预定轨迹运动时不会出现碰撞,是轨迹规划的参考依据。控制仿真是设计控制算法模拟驱动飞机部件的运动,验证控制方案的必要过程,大部件对接中为保证多定位轴运动的同步性,需设计控制策略与控制算法,要自动辨识网络延迟模型,在考虑网络延迟、运动稳定性等因素的情况下进行算法设计,会在MATLAB中进行,并通过API与ACIS&HOOPS中的模型交互。

(3)离线仿真。仿真控制平台接收测量仿真模型的测量数据,进行装配仿真,驱动模型进行控制仿真,在此过程中通过添加噪声的方式模拟实际中的误差形式,再实现自适应、自验证,保证装配仿真的顺利进行。

(4)在线仿真与系统验证。仿真控制平台不变,变化的是接收的测量数据是实测数据、驱动的是实际的数控设备,实测数据需要进行相应的数据转化为仿真控制平台所用,驱动实际设备需要将仿真控制平台设计的控制算法转化为NC代码。测量数据可帮助我们将实际部件的对接情况实时呈现,并能与设计的仿真情况进行比较,发现误差,进行必要的在线修改,推动实际装配的进行,工作流程如图3所示。

关键技术及解决方案

1 基于仿真控制的ACPS结构设计

从体系结构、层次划分、功能模型、系统开发流程等方面进行原型系统总体设计,在前面几章中有论述。

2 基于仿真的运动轨迹规划设计与优化

在飞机大部件对接过程中,运动轨迹规划技术直接影响了对接的精度,是离线预装配仿真的重要部分。运动轨迹规划是指规划运动部件的

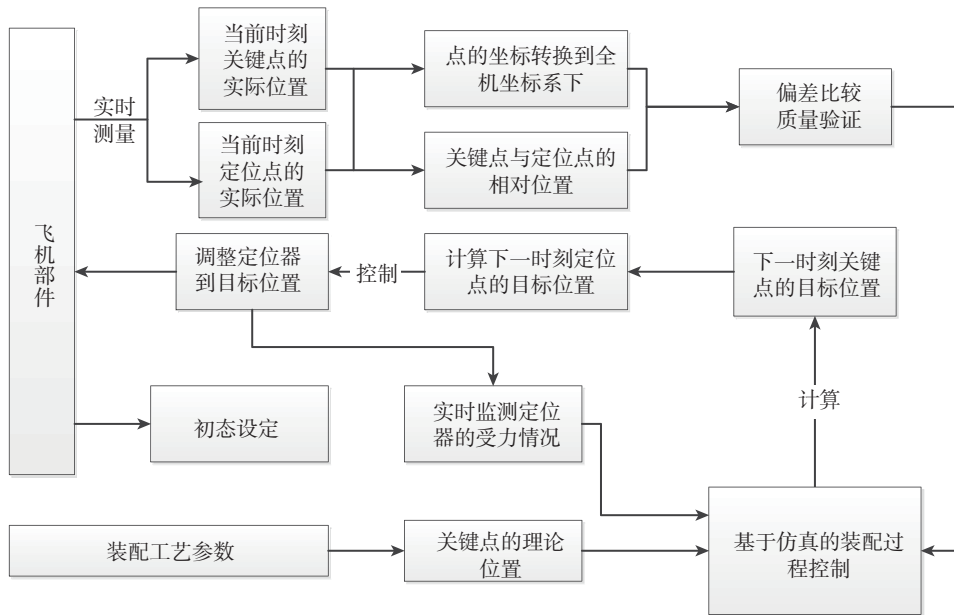


图3 在线仿真工作流程

运动参数,包括一系列的位置、速度、加速度和时间,简称 PVAT(Position Velocity Acceleration Time)。已有不少研究是关于飞机对接过程中的轨迹规划技术,较好的运动轨迹不仅能使大型部件的运动满足基本的对接需求,还能使部件的内力、机器人的关节驱动力等性能指标得到优化^[4],本文提出基于仿真的运动轨迹规划的优势在于:确定运动轨迹函数之后进行装配仿真,三维可视化显示对接运动过程,及时发现运动函数设计中可能存在的问题,结合仿真结果进行轨迹优化。

解决方案:比较五次多项式、切比雪夫三角函数、指数函数等运动函数模拟下的位移、速度、加速度、驱动力、运动副反力的变化情况,分析各函数的优势,确定一种组合函数作为机身运动轨迹,然后反解各定位轴的运动轨迹;添加最短时间约束、最小驱动力约束、最小载荷分配约束、最少变换次数约束,对以上运动轨迹进行优化;对接轨迹仿真,在仿真环境中进行装配过程模拟,及时发现问题;最终实现目标——减小运动误差、减小调姿内力。

3 协同控制

在飞机大部件对接过程中另一重要的是多个数控定位器的协同控制问题,而且在网络化的情况下,不但要保证各单轴闭环控制的稳定性,还要保证多轴之间实现精密的协同运动,以满足现代自动化设备的功能要求,因此多轴协同控制系统要求运动控制网络不但要具有足够的通信实时性,各节点之间还必须具备精密的时间同步性能^[10]。因此我们主要研究的问题是,实时协同控制。

解决方案:从控制策略入手,分析比较虚拟总轴方式、并行方式、交叉耦合方式的优劣,提出集以上各方式优势的控制策略;比较模糊、神经网络、自适应控制、反馈预估补偿算法、滑模变结构控制算法等的优势,结合项目实际建立网络延迟模型(数据传输延迟)和其他延迟模型(计算、仿真耗时),引入前馈补偿等对算法进行改进,另外适当考虑信号干扰等情况进行算法改进,保证控制的鲁棒性;最终目标:控制的准确性、实时性、稳定性,评判指标选择位姿差(实际与仿真模型)、时间差、干扰下是否回稳及所需时间。

协同控制问题是研究的重点,作者将按照“协同控制算法——可视

化的协同控制仿真——物理信息融合的协同控制验证”的顺序推进研究过程。

结论

本文基于 MATLAB、ACIS&HOOPS、CATIA 各自的特点,构建基于仿真控制的飞机大部件对接原型系统,并且结合 CPS 中物理信息融合的思想,提出融合测量、仿真、计算、控制、通讯的结构层次划分方法,接着给出了仿真控制平台的功能模块且具体分析了各模块完成的工作,然后基于目前的试验条件分别就纯仿真试验系

统和物理信息融合系统两种形式对原型系统的开发流程进行了论述,最后对开发中的关键技术进行了简单的描述。本文主要是原型系统的设计和实施方案,为下一步系统开发和理论验证提供了支撑。

参考文献

- [1] Dong J, Xiao T, Zhang L. A prototype architecture for assembly-oriented cyber-physical systems. *AsiaSim*, 2012(1):199-204.
- [2] 王东, 张林鎰, 邹方, 等. 基于 OGRE 和 PhysX 的飞机柔性装配仿真系统. 第四届数字化柔性装配技术论坛会议论文集. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- [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. *航空精密制造技术*, 2011, 47(3):44-48.
- [4] 杜兆才, 邹方. 多机器人协调操作系统实现飞机大型部件对接的轨迹规划. *航空制造技术*, 2009(24):88-91.
- [5] 郭志敏, 蒋君侠, 柯映林. 基于三坐标定位器支撑的飞机大部件调姿内力. *浙江大学学报(工学版)*, 2010, 44(8):1508-1513, 1552.

本文共有参考文献 10 篇,因篇幅所限,未能一一列出,如有需要,请向本刊编辑部索取。(责编 亿霖)