

# 基于DELMIA的飞机大部件调姿 对接仿真方法\*

石循磊<sup>1</sup>, 邓健健<sup>2</sup>, 盖宇航<sup>1</sup>, 张继文<sup>1</sup>

(1. 清华大学机械工程系, 北京 100084;

2. 航空工业昌河飞机工业(集团)有限责任公司, 景德镇 333002)

[摘要] 基于 DELMIA 平台, 提出一种飞机大部件调姿、对接等装配过程的系统仿真方法。在分析了装配整体流程和需求后, 针对并联机构、运动过程、干涉分析等仿真难点问题分别进行了研究: 提出了一种多 POGO 柱并联调姿系统的设计方法, 可以仿真多 POGO 柱以及工件的联动; 利用 DELMIA 中的 Tag 点及示教功能, 实现了运输、入位、调姿、对接等过程的仿真; 在系统中加入测量系统和产品的干涉检查模块, 能够对装配全程可能发生的碰撞和激光跟踪仪光线遮挡情况进行检测。最后, 通过对某型号飞机总装过程进行仿真, 验证了本方法的有效性。

关键词: DELMIA; 计算机仿真; 飞机装配; POGO 柱; 调姿; 干涉检查

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2020.23/24.024



石循磊

博士研究生, 主要研究方向为航空航天机器人技术与自动化装备。参与某型飞机段件自动对接装配项目等课题研究。

近年来, 具有高效率、高精度、柔性等特点的飞机数字化装配技术发展迅速, 成为飞机制造业中不可或缺的一部分<sup>[1-2]</sup>。其中装配仿真技术能够对装配系统的设计和制造提供理论依据, 例如分析干涉情况、极限位置、结构尺寸等, 对缩短研发周期、减少生产成本、验证系统有效性具有重要意义<sup>[3]</sup>。

飞机装配分为组件装配、部件装配和总装 3 个部分, 而大部件调姿对接即飞机总装环节是飞机装配最关键的部分<sup>[4]</sup>。总装环节部件的尺寸较大, 一般需要辅助托架和保型架支撑, 装配过程中各实体的位置紧凑, 极易发生干涉碰撞。另外, 总装过程装配流程较多, 调姿系统运动复杂, 单纯理论分析难以确保装配系统及工序设计的合理性。因此针对飞机总装过程的计算机仿真显得尤为重要。

然而飞机大部件调姿对接任务

的仿真实现仍存在以下难点: 其一, 并联调姿系统难以仿真, 飞机装配中常用多个 POGO 柱实现并联调姿, 而仿真软件一般无法直接对并联机构进行建模仿真; 其二, 装配仿真过程中调姿机构的末端位置发生改变, 不能按照 1 个机器人对应 1 个末端的思路进行设计; 其三, 测量系统光线遮挡情况难以仿真, 常用的激光跟踪仪往往因为布置不当而产生光路被遮挡的情况。国内外专家学者针对飞机大部件装配仿真问题进行了诸多研究开发。应征等<sup>[5]</sup>构建了一种四定位器调姿机构的动力学模型, 模拟了调姿过程。徐源<sup>[6]</sup>和刘永强等<sup>[7]</sup>通过 CATIA 和 ADAMS 建立了一种 3-2-1 自由度的三定位器模型, 但该模型与实际调姿系统自由度不同, 不能分别主动控制各个 POGO 柱实现调姿。戴肇鹏<sup>[8]</sup>将测量系统集成到对接控制软件中, 实现了调姿

\* 基金项目: 摩擦学国家重点实验室资助项目 (SKLT2019C08)。

过程控制和管理,但未考虑激光跟踪仪光线遮挡的仿真。林美安<sup>[9]</sup>详细探讨了 DELMIA 仿真中可能产生的干涉情况和 Tag 点信息处理方法。Jayaweera 等<sup>[10]</sup>通过多刚体建模仿真了大型航空构建的装配过程。

已有的相关研究取得了诸多成果,但仍存在上述不足或集成不全面之处。本文综合运用 DELMIA 仿真平台下的多个模块,提出了一种大部件调姿对接的仿真方法,包括多 POGO 柱并联调姿系统仿真方法、大部件运动过程仿真方法和测量与干涉仿真方法。最后结合某型飞机总装过程,验证本方法的有效性和效率。

### 多 POGO 柱并联调姿系统仿真方法

飞机大部件调姿对接一般采用多 POGO 柱并联调姿系统实现,其原理如图 1 所示<sup>[11]</sup>。每个 POGO 柱具有  $x, y, z$  3 个方向的平动自由度,顶部分别通过球铰机构与调姿对象连接,最少需要 3 个 POGO 柱即可实现调姿对象的六自由度调姿。调姿时需要联动控制多个 POGO 柱,保证多个 POGO 柱末端的相对位置不变。调姿的目标是让大部件到达某一指定的空间位姿,一般由测量结果给出,因此大部件的始末空间位姿是已知的,而每个 POGO 柱各轴的运动情况是待求的,问题本质是对该并联系统进行逆运动学求解。

如果完全按照实际多 POGO 柱系统的运动机构,在仿真软件建立调姿系统,如图 2 所示,整个调姿系统是一个机械装置,每个 POGO 柱的基座固定,有 3 个主动驱动的棱形运动副和 1 个无驱动的球铰运动副,系统的逆运动学末端是调姿对象。这种方法会导致机械装置的约束过多,无法进行运动模拟。现有的解决方法是分别设置 3 个 POGO 柱的主动驱动运动副个数为 3-2-1,但

这种设计方案导致 3 个 POGO 柱不等同,调姿过程中不能主动控制每个 POGO 柱的位置。

考虑到球铰运动副的运动形式可以由 3 个旋转运动副替代,设计一种 6 驱动的 POGO 柱,如图 3 所示。机械装置由 3 个棱形运动副和 3 个虚拟的旋转运动副组成,末端 Tool 坐标轴与第 3 个旋转运动副平行。

此时单个 POGO 柱相当于一个六自由度机械臂,但其末端逆运动学求解器为 Cartesian[TTT:RRR] 类型,已知末端位姿可反解出各关节的位置。由于 3 个旋转关节的旋转轴交于一点,可将末端位姿分解成位置和姿态两个独立部分,所以该机构的运动学逆解一定是唯一解。

考虑多个 POGO 柱联合运动,

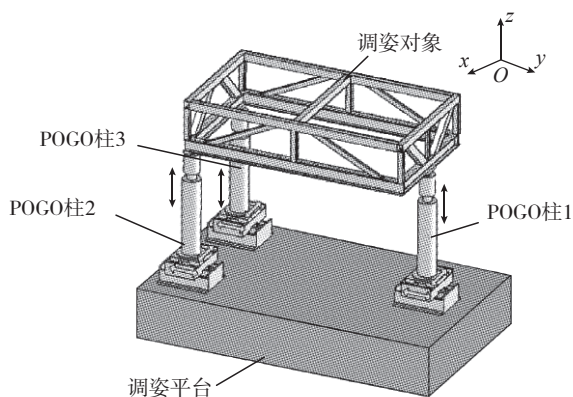


图1 多 POGO 柱调姿原理示意图

Fig.1 Principle of posture alignment with multi POGO sticks

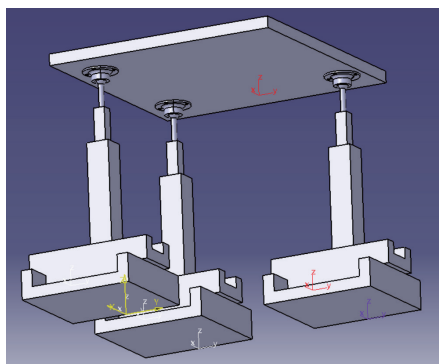


图2 过约束的多 POGO 柱机械装置

Fig.2 Mechanical device of over-constrained multi POGO sticks

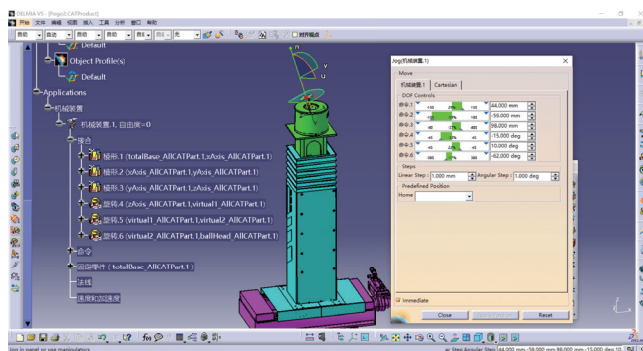


图3 六自由度 POGO 柱机械装置

Fig.3 Mechanical device of 6-DOF POGO stick

如图4所示,调入4个相同的 POGO 柱与工件连接。调姿过程中,某一时刻工件的位姿是唯一确定的,假设工件的形变可忽略,则4个 POGO 柱的末端可认为存在刚性连接关系。因此可以将4个 POGO 柱的末端都移动到工件上某个固连坐标系(图中指南针位置,记为 TCP),以这个新的末端位置进行逆运动学解算,得到这一时刻各个 POGO 柱的关节位置。仿真调姿过程中,实际上只需设定某个 POGO 柱牵引着调姿工件运动,其他3个 POGO 柱的 TCP 同时按照相同的轨迹进行运动,即可实现多 POGO 柱各关节位置的联动。这种方法避开了 DELMIA 等仿真软件普遍存在的并联机器人仿真困难的问题,用3个主动的旋转运动副代替被动的球铰运动副,将调姿过程转化为多个串联机械臂的协同运动。

## 运动过程与干涉检查仿真

### 1 大部件运动过程仿真方法

将三维模型和运动机构建立完成并放置于布局位置后,开始仿真装配运动过程。典型飞机总装站位初始时各部分状态如图5所示,其中隐藏了飞机部件、工作梯、集控系统等,只显示了辅助托架、AGV(Automated Guided Vehicle)、多 POGO 柱调姿系统及测量系统等与装配运动过程密切相关的部分。

装配仿真过程为:AGV 运输辅助托架及大部件入位,相应的 POGO 柱组移动,与托架球头连接,然后 AGV 撤出,POGO 柱将托架及大部件调整到指定位姿,其他部分以此类推。AGV 的运动较为简单,POGO 柱的运动较复杂,可分为连接和调姿对接两部分。

在 DELMIA 中仿真物体的运动实质上是确定其运动路径点和两点间隔时间,然后以插值算法规划出连续的运动过程,因此主要任务是将运动物体的末端与路径点空间位姿联

系起来。软件中的 Tag 点可以认为是一个空间坐标轴,描述了某个空间位姿,分为与实体固连和与世界坐标系固连两种。对于一个实体的运动,可以设定多个 Tag 点为运动轨迹的中间节点,选定实体和 TCP 后,就确定了该运动过程。AGV 的运动一般只需设置始末两个世界坐标系下

的 Tag 点即可。POGO 柱主动连接辅助托架的运动过程需要将 Tag 点设置为与托架固连,并且 TCP 为图4中的末端。POGO 柱并联调姿过程则需要把 TCP 设置为图5中建立在工件上的末端,相应 Tag 点即为调姿过程中工件的始末及中间位姿(图6)。

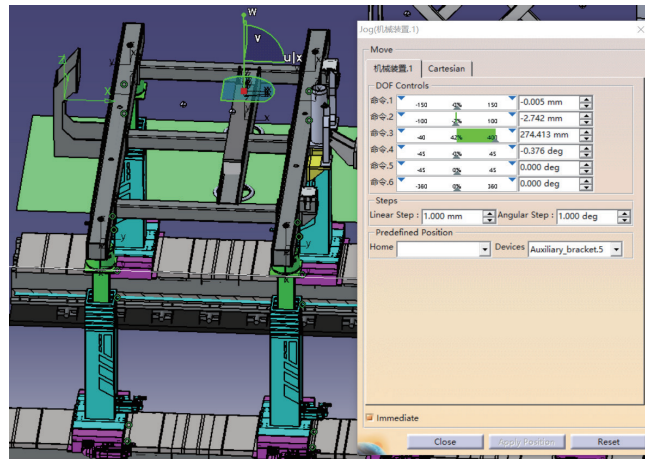


图4 多POGO柱并联调姿系统

Fig.4 Parallel posture alignment system with multi POGO sticks

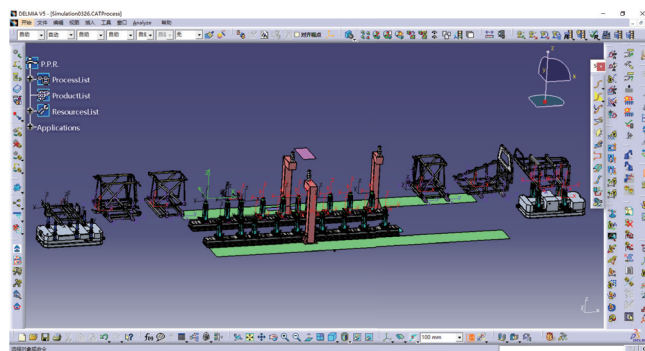


图5 全局初始状态

Fig.5 Overall initial state

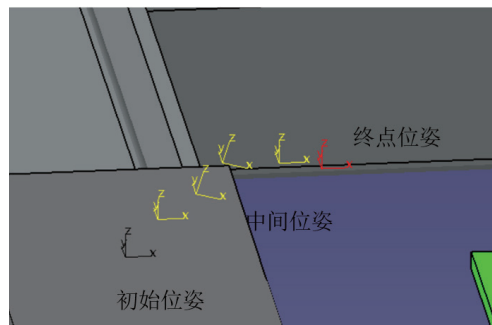


图6 调姿过程Tag点示意图

Fig.6 Tag points in posture alignment

完成了单个装配运动过程的设计后,在 Workcell Sequencing 模块下编排装配工序,图 7 是装配全过程的 PERT 图。在多 POGO 柱调姿工序中,需要设置 4 个 POGO 柱以相同 Tag 点轨迹同时运动。

## 2 测量与干涉仿真方法

对于飞机总装过程,仿真分析的主要任务是测量系统验证和实体干涉检查。实际工厂中的测量系统主要由多台激光跟踪仪组成,在 DELMIA 仿真中各部件的精确坐标可以通过计算机直接得到,因此对测量系统的仿真任务主要是检测跟踪仪到测量靶球点的光路是否被遮挡。提出一种仿真激光遮挡情况的方法,如图 8 所示,从跟踪仪发射一个小实体球到测量靶球位置,在小球运动过程中如果发生碰撞则认为光线被实物遮挡。根据光线遮挡情况,先调整激光跟踪仪的布置,如果仍无法消除遮挡情况,则考虑增加激光跟踪仪或改变工装结构。

装配过程中的干涉检查能够对工装的结构设计、运动机构的运动范围以及装配流程等方面提出指导意见。如图 9 所示,开启碰撞检测,设置要检测的产品,在仿真过程中会高亮显示发生干涉碰撞的实体,并输出实体名称。

## 仿真试验结果与分析

对于某型飞机段件调姿对接过程,采用本文方法仿真其主要工序:基准段首先运输上架,完成测量调姿后固定;前段从前端运输上架,后段从后端运输上架,分别测量调姿后,向基准段移动对接,固定;其他段依次上架,完成调姿对接;检查对接质量;制孔;各部件分离;二次对接和检查。在 AMD Ryzen 5 2500 处理器,8GB 内存的笔记本电脑上流畅运行仿真约 120s,分析得出了多处光线遮挡和实体干涉情况(如图 9 中过渡段与尾段托架干涉),仿真方法的有

效性和高效率得到验证。装配系统的调整优化主要是通过修改产品位置、结构和运动轨迹来消除已发现的干涉情况,直到装配仿真全过程不发生光线遮挡和干涉碰撞。

## 结论

- (1) 分析了飞机大部件调姿对接仿真实现的难点和现有研究的不足。
- (2) 结合 DELMIA 软件和实际

装配要求,提出了多 POGO 柱并联调姿系统的仿真方法和基于 Tag 点的运动过程实现方法,并在仿真中加入测量系统的干涉检测。

(3) 结合某型飞机大部件调姿对接系统,仿真了全装配过程并得到了干涉检查结果,验证了本文方法的有效性。

(4) 后续工作可以完善离线程序和分析报告的导出,以及基于

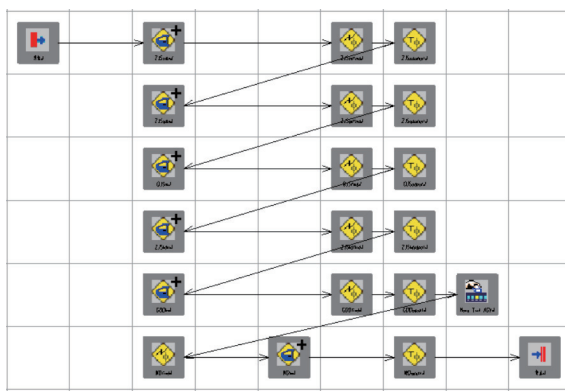


图7 装配过程PERT图

Fig.7 PERT chart of assembly process

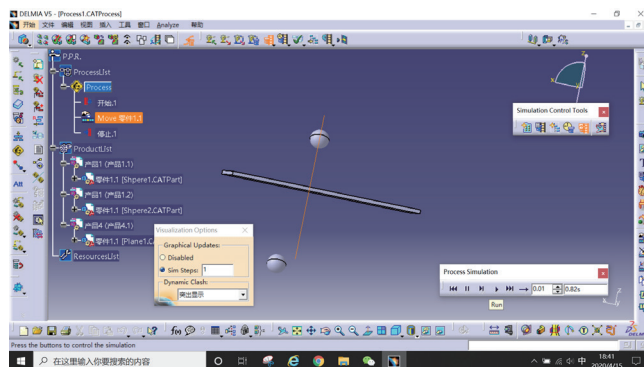


图8 光路遮挡情况仿真

Fig.8 Simulation of light occlusion

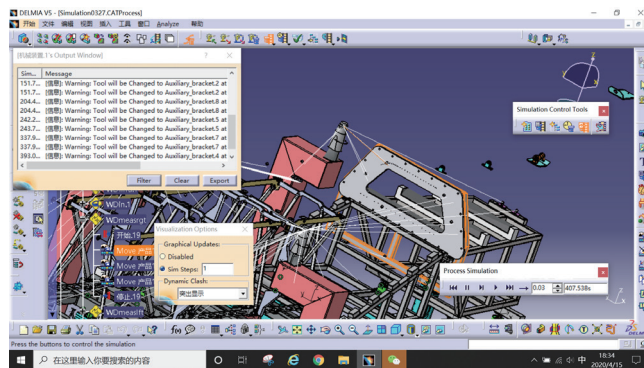


图9 干涉情况检查

Fig.9 Interference detection

CATIA 二次开发功能设计方便修改装配参数的交互界面。

### 参考文献

[1] 张树生, 杨茂奎, 朱名铨, 等. 虚拟制造技术[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2006.

ZHANG Shusheng, YANG Maokui, ZHU Mingquan, et al. Virtual manufacturing technology[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2006.

[2] SOETEBIER S, MÜLLER C, MAUSER N, et al. Flexible automation for automotive body assembly[C]//Proceedings of 4th IEEE Conference on Automation Science and Engineering. Washington, 2008.

[3] 徐源. 飞机机身装配调姿仿真技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.

XU Yuan. Research on simulation technology about wing-fuselage posture alignment of aircraft assembly[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017.

[4] 李西宁, 支劲伟, 蒋博, 等. 飞机总装数字化脉动生产线技术[J]. 航空制造技术, 2016, 59(10): 48-51.

LI Xining, ZHI Shaowei, JIANG Bo, et al. Digital pulsation production line for aircraft

final assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(10): 48-51.

[5] 应征, 黄浦缙, 王青, 等. 飞机大部件调姿机构柔性多体动力学建模与仿真[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(11): 2470-2475.

YING Zheng, HUANG Pujin, WANG Qing, et al. Modeling and simulation of flexible multi-body dynamics for large aircraft components alignment mechanism[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2012, 18(11): 2470-2475.

[6] 徐源, 沈建新. 机翼调姿对接运动仿真技术研究[J]. 机械制造与自动化, 2018, 47(2): 110-113.

XU Yuan, SHEN Jianxin. Research on kinematic simulation of aircraft wing adjustment-docking[J]. Machine Building & Automation, 2018, 47(2): 110-113.

[7] 刘永强, 黄翔, 方伟, 等. 基于 ADAMS 的机翼调姿动力学仿真[J]. 机械工程与自动化, 2011(2): 1-4.

LIU Yongqiang, HUANG Xiang, FANG Wei, et al. Dynamic simulation of aircraft wing adjustment by ADAMS[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2011(2): 1-4.

[8] 戴肇鹏. 飞机部件对接调姿技术研究软件开发[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.

DAI Zhaopeng. Research on the

adjustment technology of position and pose for aircraft component assembly and software development[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015.

[9] 林美安. 飞机机身装配工艺及仿真技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.

LIN Meian. Research on the assembly process and simulation of aircraft fuselage[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010.

[10] JAYAWEERA N, WEBB P. Adaptive robotic assembly of compliant aero-structure components[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2007, 23(2): 180-194.

[11] 郭志敏, 蒋君侠, 柯映林. 基于 POGO 柱三点支撑的飞机大部件调姿方法[J]. 航空学报, 2009, 30(7): 1319-1324.

GUO Zhimin, JIANG Junxia, KE Yinglin. Posture alignment for large aircraft parts based on three POGO sticks distributed support[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(7): 1319-1324.

通讯作者: 张继文, 助理研究员、博士, 研究方向为航空先进制造装备系统集成的建模和仿真, 机器人的运动规划、感知及环境建模等, E-mail: jwzhang@mail.tsinghua.edu.cn。

## Simulation Method of Posture Alignment and Docking of Large Aircraft Components Based on DELMIA

SHI Xunlei<sup>1</sup>, DENG Jianjian<sup>2</sup>, GAI Yuhang<sup>1</sup>, ZHANG Jiwen<sup>1</sup>

(1. Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. AVIC Changhe Aircraft Industry (Group) Corporation Ltd., Jingdezhen 333002, China)

**[ABSTRACT]** Based on the platform of DELMIA, a system simulation method for posture alignment and docking of aircraft large parts is proposed. After analyzing the overall assembly process and requirements, the difficulties such as simulation of parallel mechanism, motion process and interference analysis are studied: a design scheme of parallel posture alignment system with multi POGO sticks is proposed, which can simulate the united movement of multi POGO sticks and workpiece; the simulation of transportation, positioning, posture alignment, docking and other processes is realized by using Tag points and teaching functions in DELMIA; interference inspection of measurement system and product is added, which can detect the possible collision and light occlusion of laser tracker during the assembly process. Finally, the assembly process of a certain type of aircraft is simulated to verify the effectiveness of this method.

**Keywords:** DELMIA; Computer simulation; Aircraft assembly; POGO stick; Posture alignment; Interference detection

(责编 逸飞)