

力控制技术在飞机数字化 装配中的应用*

岳烜德, 安鲁陵

(南京航空航天大学, 南京 210016)

[摘要] 飞机数字化装配技术的发展要求提高装配自动化水平, 工业机器人因此得到广泛使用, 而工业机器人在定位精度与结构刚度上的局限性又催生了力控制技术的研究与发展。力控制技术不同于传统的位置控制, 是利用安装在机器人上的传感器反馈力的数据, 以此为依据驱动机器人将构件或工具送达最佳装配位置的技术。叙述了力控制技术的发展背景、基本原理、系统组成与应用实例, 并对力控制技术在飞机数字化装配中的进一步发展作出了展望。

关键词: 飞机; 数字化装配技术; 力控制; 工业机器人

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2016.05.047



岳烜德

南京航空航天大学硕士研究生, 研究方向为飞机装配技术。

随着飞机数字化装配技术的发展, 一系列柔性自动化装备应用于飞机构件的装配中。在航空制造业中, 工业机器人已经得到了一定的

* 基金项目: 国防基础科研项目 (A0520132008)。

应用, 如用于飞机构件的自动制孔、自动钻铆等工作^[1-3]。工业机器人工作效率较高, 善于完成重复性高、强度大的任务, 适合在生产线上使用, 可以大大加快装配速度, 改善装配质量, 提升飞机构件装配的数字化水平。然而, 工业机器人在精度方面表现出一定的局限性, 这是由于工业机器人是一个柔性开环系统, 其本身刚度较低且在工作中存在不可避免的弹性变形, 因此装配时在外力作用下会发生较大的位移与变形, 装配精度难以保证^[4]。工业机器人的低精度与飞机装配过程中严格的公差要求相矛盾, 在一定程度上制约着工业机器人在飞机构件装配中的应用。

传统的飞机装配使用的是以“位置控制”为基础的装配定位方法, 即利用安装在装配型架上的定位件对飞机构件进行定位, 使其与理论数模在一定误差范围内保持一致, 以保证装配精度。这一方法至今仍被广泛使用, 在最大限度保证装配质量的同时, 也

不可避免地显示出一定的局限性。首先, 装配型架的设计、制造、安装与调整需要较长的生产准备周期, 占用大笔资金, 不利于敏捷制造的实现与并行工程的进行; 其次, 在型架上装配构件时, 工序较为繁琐, 需要人为调整构件位置、夹紧、制孔、去毛刺、清理、连接等, 对于复合材料构件, 还要进行复杂的填隙补偿工作, 这无疑加大了工人的劳动量, 不利于自动化、数字化在飞机装配中的应用^[5-7]。

因此, 在位置控制的基础上, 引入力控制技术, 并依靠标准工业机器人平台进行飞机构件装配的方法得到了广泛研究^[8-10]。

力控制技术基本原理与 系统组成

早期的工业机器人面对的任务比较单一, 有的很少与工作对象发生接触, 如用于喷漆的机器人; 有的虽然会与其他物体发生接触, 但无需控制接触力的大小, 因此只使用简单的位置控制即可。随着机器人控制技

术的进步及它在航空工业中的广泛应用,情况发生了明显的变化。工业机器人越来越频繁地与构件发生接触,如利用工业机器人进行定位、制孔、抛光、去毛刺等,为了保证装配精度且不损伤构件,必须把接触力限制在一定范围内,这就要求机器人具备位置控制与力控制两种功能。为了实现力控制的功能,一般要在工业机器人的末端执行器上安装力/扭矩传感器,实时监控工作过程中力和扭矩的大小,并将其传输给控制器。控制器针对反馈回的力/扭矩数据进行分析,生成操作代码,驱动机器人以特定的速度移动到特定的位置,从而在保证合理位置精度的基础上实现接触力/扭矩的精确控制。实现力控制的方法较多,一般可以分为4大类:阻抗控制、力/位置混合控制、自适应控制与智能控制^[11]。

使用阻抗控制时,不直接控制机器人与构件之间的接触力,而是根据机器人末端执行器的位置(或速度)和末端作用力之间的关系,通过调整反馈位置误差、速度误差或刚度来达到控制力的目的。力/位置混合控制的最终效果是实现力与位置的独立控制,即在力的自由空间进行力控制,在剩余的正交方向进行位置控制。上述两种控制方法属于经典的控制范畴,为力控制技术的发展打下了坚实的基础,然而从控制效果来看仍有不足,无法在工业中推广使用。为了克服机器人的多自由度、运动位姿不确定性等诸多问题,众多学者研究了机器人的自适应控制,如采用自适应学习的混合控制方法进行机器人约束运动控制等。随着机器人智能化的不断发展,智能控制必将成为下一代机器人控制的主流,从研究成果来看,智能控制仍处于起步阶段,尚未形成独立的控制策略,仅仅将智能控制原理如模糊和神经网络理论对以往研究中无法解决的难题进行新的尝试,仍具有一定的局限性^[12]。

目前在工业机器人力控制方法的研究中,一般把力/扭矩的数值作为反馈信号,处理后作为控制信号驱动机器人到达指定的位置。因此,基于力反馈的基础,可以使用力控制技术进行飞机构件的装配。力控制技术可以通过编程使构件达到特定的位置,也可以利用机器人使构件之间达到特定的装配力,通过控制构件之间的装配力,使其达到要求的位置精度,实现构件之间的最佳配合。需要注意的是,这一最佳配合是指接触力与接触力矩数值上的最佳,而不仅仅是传统意义上的位置最佳。力控制技术可以用于装配、钻孔、去毛刺等工序中。

使用生产中常用的工业机器人,配合一定的力控制技术可以达到较高的装配准确度,相比于传统的定位方法,这一方案可以大大加快装配速度,最大限度地减轻工人的劳动强度。由于其具有较高自动化水平,因此适用于重复性与可靠性要求较高的生产与装配。此外,这一方法仅使用低成本单传感器就可实现多种操作,因而可以大大降低成本。最后,这项技术对于少型架装配与可重构工装的使用提供了一条技术路线。

力控制系统的基本组成包括工业机器人、工业机器人控制器、主机、真空夹头或其他末端执行器、力/扭矩传感器等,如图1所示^[13]。其中,

工业机器人是主要功能部件,它的末端根据不同的任务需求安装不同的末端执行器。如果进行构件定位,则使用真空夹头夹持构件,如果进行制孔,则安装制孔单元。力/扭矩传感器与末端执行器相连,用于实时动态监测装配过程中力与力矩的大小和方向,因此要求传感器是一个6自由度的传感器,可以测量X、Y、Z三个方向的力和绕3个轴的力矩。主机主要用来处理数据以及生成可执行代码,在主机中状态流模型得到建立与实施,针对不同位置和力的数据,生成控制机器人运动的执行代码。机器人控制器主要用于生成机器人的控制算法,并最终驱动机器人,以特定的速度到达特定的位置,实现构件的最佳配合与精确定位。为了提高系统的运行效率,可以在控制系统中增设额外的处理器,国外研究者试验中使用摩托罗拉G4处理器^[13],使其通过公共总线与主机和机器人控制器之间建立通信。这一措施可以显著提高机器人对装配环境变化的反应速度。

力控制在复合材料构件装配中的应用

Linköping大学的Jonsson等^[13]在实验室利用工业机器人,基于力控制技术进行了复合材料翼肋的装配,如图2所示。



图1 力控制系统的基本组成

Fig.1 Basic components of the force control system

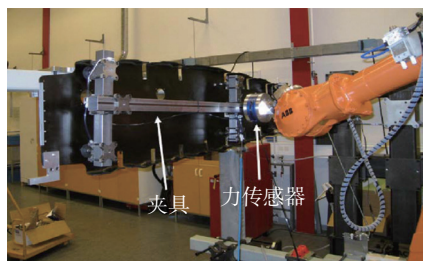


图2 复合材料翼肋的装配试验
Fig.2 Assembly experiment for composite rib

试验过程是将一个复合材料制成的翼肋安装到型架上,型架上有多个定位器,形成了多重控制表面,试验的目的就是使翼肋与多重表面达到要求的装配准确度,如图3所示。复合材料构件在成形过程中会发生较大的变形,形状准确度较差,在装配过程中又不允许修配,因而会形成较大的装配间隙,需要进行额外的填隙补偿工作。使用力控制的方法,不仅可以使构件的位置精度达到要求,还可使间隙最大程度减小,从而简化填隙补偿工作,提高装配效率。装配状态如图3所示。

型架上的定位器可以限制翼肋的6个自由度。装配过程可以看作一个寻找接触点与控制接触力的操作,试验中构件与型架之间装配力控制在10N以内,接触力矩要求为0。翼肋最终装配状态如图3(b)所示,具体的操作步骤就是翼肋与各个定位器建立接触的过程:

步骤1:从初始位置启动机器人,使翼肋与位置2左端定位器接触;

步骤2:绕翼肋左边缘旋转直到其与位置2右端定位器接触;

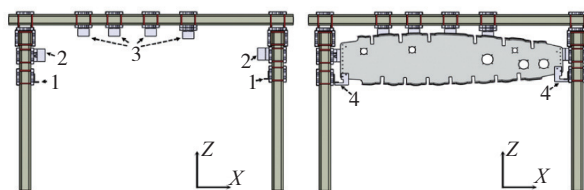
步骤3:倾斜翼肋,直到它与位置3定位器接触;

步骤4:储存位置信息并退出;

步骤5:提升翼肋,直到它与位置1的一个或两个定位器接触;

步骤6:如果只与一个定位器接触,则旋转其边缘与另一个接触;

步骤7:记录位置信息,让翼肋下移,直到接触解除;



(a) 试验用型架 (b) 翼肋最终装配状态

图3 装配试验用型架与复合材料翼肋最终装配状态

Fig.3 Jig for assembly experiment and final assembly state of composite rib

步骤8:垂直移动翼肋,直到其接触位置2左端定位器内部边缘;

步骤9:向相反方向移动翼肋直到翼肋接触位置2右端定位器内部边缘;

步骤10:翼肋中间位置由计算机确定,并且利用步骤4和步骤7的数据来确定最后位置。

从一个步骤到另一个步骤的过渡是用力传感器的读数反馈实现的,装配顺序模型在主机的状态流中建立。通过反馈的力和扭矩数据,驱动机器人实现翼肋的精确定位。

定位完成后,间隙将不可避免地存在。在复合材料构件装配过程中,有两种方法解决间隙问题。如果间隙较小,则使用机器人在特定的位置施加特定的压力,间隙消除后即可进行连接工作,这就要求事先确定构件在装配过程中能承受多大的力,以免损伤构件。如果间隙较大,施加外力后仍不能完全消除,则必须进行填隙补偿工作,但是相比于传统的位置控制方法,这种情况下的填隙补偿工作量将大大减少。

使用机器人进行的全自动装配存在一个问题就是机器人在搜索接触点时必须运动非常缓慢,因为装配环境刚性较大,构件与定位器快速的接触会形成巨大的瞬时冲击力。刚性环境所引起的另一个问题是它要求力反馈速度较快,因为接触以后,较小的运动会形成较大的接触力。当选择变化过快的控制参数时,可能会导致系统的稳定性问题。因此,在装配过程的第一步完成之后,在控制

中恰当地使用前馈系统会有更好的控制效果。加快装配进程的另一个方法就是使用视觉系统,它可以在构件快要接触时,使得控制器减慢运动速度。这一装配方案也可以用于半自动化情况中,操作者可以人为地移动机器人执行器到初始位置,建立第一个接触后,再触发机器人建立后续的接触关系。

力控制在自动制孔中的应用

Lund大学的Olsson等将力控制技术应用到了机器人自动制孔中^[4]。飞机数字化装配中,自动制孔技术已得到广泛应用。工业机器人凭借其灵活性与较高的生产效率,被大量运用于自动制孔中。然而,工业机器人较低的刚度与位置精度始终影响着制孔质量的提高。自动制孔之前要将两个构件压紧,以防止制孔时构件之间产生毛刺,也可以防止切屑进入构件之间而将其划伤。制孔时钻头要与蒙皮外法线方向重合,这样才能保证制孔精度。然而,由于制孔过程中工具产生的振动以及切削力的影响,蒙皮往往会发生变形,此时,钻头与蒙皮外法线方向产生偏斜,形成了一个与蒙皮相切的力。这样不仅使孔的精度难以保证,还会由于切向力的作用而产生侧滑,影响其位置精度。为了防止侧滑,提高制孔精度,使用力控制的自动钻孔技术在试验中得到了研究。

自动制孔的末端执行器如图4所示^[5],它是一个制孔单元与传感器的组合,工作过程中将传感器产生的

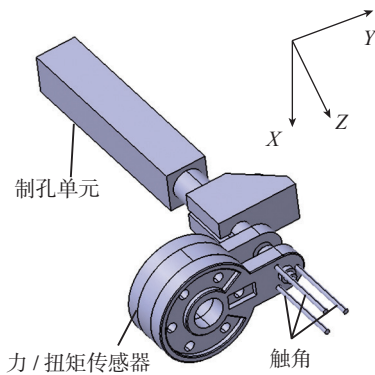


图4 制孔末端执行器
Fig.4 Drilling end-effector

力和扭矩的数值传递给机器人控制器。钻孔的工具装备有一个三脚架，三脚架的3根触角对称地分布在钻头的周围。当每一个触角与工件表面接触时，就会产生接触力并传递到传感器上。3个触角用来识别钻头周边非对称的力，以对其进行补偿，使之达到平衡状态，此时可以保证制孔刀具轴向与蒙皮外法线方向重合。力传感器安装在制孔单元与压力脚之间。Z方向的力表示在表面预加压力的数值，X-Y方向的力表示影响滑移的切向力。

力/扭矩传感器的6个自由度在不同的接触状态下探测不同的力/扭矩数值，并作为反馈信号使制孔单元保持正确的位置。如果末端执行器绕着X或Y轴旋转，扭矩将会增加，这就表示末端执行器没有与工件表面处于垂直状态。此时，控制器会使用扭矩计算方法来调整，使3个触角的接触力值相等。控制器会控制Z方向的力来改变表面的接触力，会控制X与Y方向的力使其变为0，这样可以避免侧滑。如果没有补偿，由于机器人系统的柔性，蒙皮表面会产生较大的变形，严重影响孔的质量与位置精度。

传统的飞机蒙皮由大量钣金零件构成，刚度较低，制孔时在外力作用下容易发生变形，这会引起制孔质量的降低。因此试验时使用了一块刚性较低的钣金零件，以验证使用力

控制制孔技术的可行性。尽管在制孔前钣金零件已经被夹紧，然而在切削力作用下其外法线方向仍发生了变化，这时就需要使用力反馈来修正这一误差。当表面外法线方向改变时，力/扭矩传感器将不平衡的力传递给控制器，控制器检测到这一误差后，控制末端执行器旋转制孔单元方向使之与外法线重合。试验表明利用这一方法可以显著提高孔的质量与位置精度。

结束语

随着飞机数字化装配技术的发展，使用力控制技术的工业机器人将越来越广泛地应用于飞机部件装配中。与传统的位置控制不同，力控制技术通过控制接触力与扭矩的大小，精确定位飞机构件，使构件达到要求的装配准确度，大大提高装配效率。在复合材料构件的装配中，使用力控制技术的机器人可以保证定位精度且大大减少填隙补偿工作量；在低刚度蒙皮的制孔过程中，机器人可以抑制侧滑，并根据蒙皮的变形实时调整制孔单元方向，保证了制孔精度，提高了制孔效率。然而，也应当注意到这一技术存在的不足。第一，定位与制孔过程中，寻找正确位置的搜索操作耗费时间较长。这是因为系统单一依赖力反馈，而整个反馈过程中数据传输、数据处理、信号延迟等问题都会导致搜索操作时间延长，为了解决这一问题，可以在控制系统中加入前馈环节，提高系统的反应速度。第二，现有的控制软件只能通过手动输入控制参数，每一次操作均要重新输入。因此需要开发新一代的控制系统，它需要更加智能化以简化人为操作。第三，这一技术目前还不够成熟，仍处于试验研究阶段，距离工业化的大规模应用还有一定距离，且目前只能应用于小型轻量化部件的定位与制孔，对于大部件的定位

与制孔尚需研究。随着这些问题的——解决，相信力控制技术会在飞机数字化装配中得到更为广泛的应用。

参考文献

- [1] DEVLIEG R, SITTON K, FEIKERT E, et al. ONCE (One-sided Cell End-effector) robotic drilling system[R]. SAE Technical Paper 2002-01-2626, doi:10.4271/2002-01-2626.
- [2] 秦瑞祥, 邹冀华. 工业机器人在飞机数字化装配中的应用[J]. 航空制造技术, 2010(23):104-108.
- [3] QIN Ruixiang, ZOU Jihua. The application of industrial robots in aircraft digital assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010(23):104-108.
- [4] BI S, LIANG J. Robotic drilling system for titanium structures[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011,54(5):767-774.
- [5] JAYAWEERA N, WEBB P. Adaptive robotic assembly of compliant aero-structure components[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2007,23(2):180-194.
- [6] KIHLMAN H. Affordable automation for airframe assembly-development of key enabling technologies[D]/Linköpings: Linköpings University, 2005.
- [7] MILLAR A, KJHLMAN H. Reconfigurable flexible tooling for aerospace wing assembly[R]. SAE Technical Paper 2009-01-3243, doi:10.4271/2009-01-3243.
- [8] 郑联语, 王建华. 盒式连接可重构柔性工装技术及应用展望[J]. 航空制造技术, 2013(18):26-31.
- [9] ZHENG Lianyu, WANG Jianhua. The technology and application prospects of the reconfigurable and flexible assembly tooling with box-joint[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013(18):26-31.
- [10] VAN DUIN S, KIHLMAN H. Robotic normalizing force feedback[R]. SAE Technical Paper 2005-01-3291, doi:10.4271/2005-01-3291.
- [11] SICILIANO B, VILLANI L. Robot force control[M]. London:Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [12] CACCAVALE F, NATALE C, SICILIANO B, et al. Integration for the next generation: embedding force control

into industrial robots[J]. IEEE Robotics and Automation Magazine, 2005,12(3):53-64.

[11] 张正伟. 机器人末端执行器力控制研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2005.

ZHANG Zhengwei. The research of force control in end-effector of robots[D]. Suzhou: Suzhou University, 2005.

[12] 殷跃红, 朱剑英. 智能机器人力觉及力控制研究综述[J]. 航空学报, 1999,20(1):1-7.

YIN Yuehong, ZHU Jianying. Review of the force and force control in intelligent machines[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 1999,20(1):1-7.

[13] JONSSON M, MURRAY T, ROBERTSSON A, et al. Force feedback for assembly of aircraft structures[C]//Proceedings of SAE Aerospace Manufacturing and Automated Fastening Conference, 2010.

[14] OLSSON T, HAAGE M, KIHLMAN

H, et al. Cost-efficient drilling using industrial robots with high-bandwidth force feedback[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2010,26:24-38.

[15] OLSSON T, ROBERTSSON A, JOHANSSON R. Flexible force control for accurate low-cost robot drilling[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2007.

Application of Force Control Technology in Digital Assembly of Aircraft

YUE Xuande, AN Luling

(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

[ABSTRACT] The development of aircraft digital assembly technology demands high level of automation, and the industrial robots have been widely used. Due to the positioning accuracy and stiffness limitation of the industrial robots, the force control technology has great development. Different from the traditional position control, force control technology uses sensors on the robots to get the data of force on the force feedback, and puts the components or tools to the best assembly. This paper describes the development and basic principle of force control, and the system composition and application case of this technology. Further development of the force control technology used in aircraft digital assembly is discussed.

Keywords: Aircraft; Digital assembly technology; Force control; Industrial robot

(责编 李丹)

(上接第 35 页)

2005(6):50-53.

XU Guokang. Automatic drilling & riveting and its application in digital assemble[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2005(6):50-53.

[11] 王黎明, 冯潼能. 数字化自动钻铆技术在飞机制造中的应用[J]. 航空制造技术,

2008(11):40-42.

WANG Liming, FENG Tongneng. Application of digital automatic drill-riveting technology in aircraft manufacture[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008(11):40-42.

[12] 刘平, 张开富, 李原. 壁板自动钻

铆夹持点布局优化方法[J]. 计算机集成制造系统, 2014,20(7):1625-1626.

LIU Ping, ZHANG Kaifu, LI Yuan. Optimization method of dynamic location layout for sheet metal ADR assembly[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2014,20(7):1625-1626.

Key Technology Research and Engineering Application for Large Aircraft Digital Assembly

SONG Likang¹, ZHU Yongguo^{1,2}, LIU Chunfeng¹, ZENG Tian¹

(1. AVIC Jiangxi Hongdu Aviation Industry Co. Ltd., Nanchang 330024, China;

2. Department of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

[ABSTRACT] The key technologies of large aircraft digital assembly are researched for the digital development of the large aircraft. The technologies and engineering applications of the large aircraft digital assembly are emphatically analyzed, such as assembly process simulation and digital coordination based on MBD, assembly process optimization and online assembly simulation, visualization of 3D assembly processes data, matching technology of panel digital automatic drilling & riveting, etc. Moreover, the solutions of these key technologies are proposed.

Keywords: Aircraft; Assembly; Riveting; Model based definition; Simulation

(责编 李丹)