

# 飞机自动化装配中的机器人 制孔动力学研究

## Robot Holing Dynamics Research on Automated Assembly of Aircraft

南京航空航天大学机电学院 刘长毅



刘长毅

副教授、工学博士。主要研究方向：切削机理与动力学建模、机械加工工艺优化等。主持并参与多项 863 项目、企业横向项目等。

机器人的概念自 20 世纪 20 年代在科幻小说中诞生,60 年代开始对工业机器人进行开发,80 年代起机器人、机械手在自动化制造工业现场得到应用。工业机器人发展的开始阶段受到了数控机床技术的影响,其目的在于通过可编程控制的运动来执行可变化的任务,实现自动化的加工制造。据统计,全球使用中的工业机器人 2010 年为 103.5 万台,

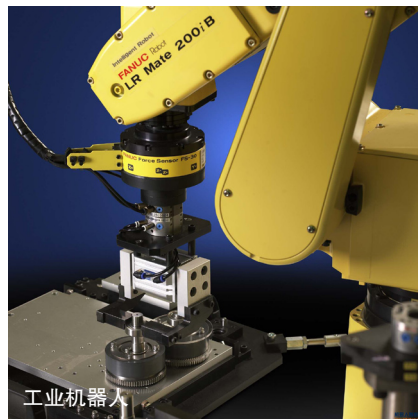
飞机结构件的寿命在一定程度上决定了飞机整体的寿命。为了满足飞机高寿命的要求,可以通过各种技术改善结构件连接点的技术状态,如连接孔的孔径精度、表面质量、配合性质等。在飞机自动化柔性装配技术中,采用机器人实现飞机部件乃至整机制造中的钻孔和铆接,是提高钻孔和铆接质量的有效技术途径。国外自 20 世纪 90 年代起,就已经大规模开展飞机自动化装配技术的研究。采用数字化自动钻铆装备实现飞机大型构件的装配和联接是提高装配效率和质量的有效途径,也是航空制造业的重要发展趋势。

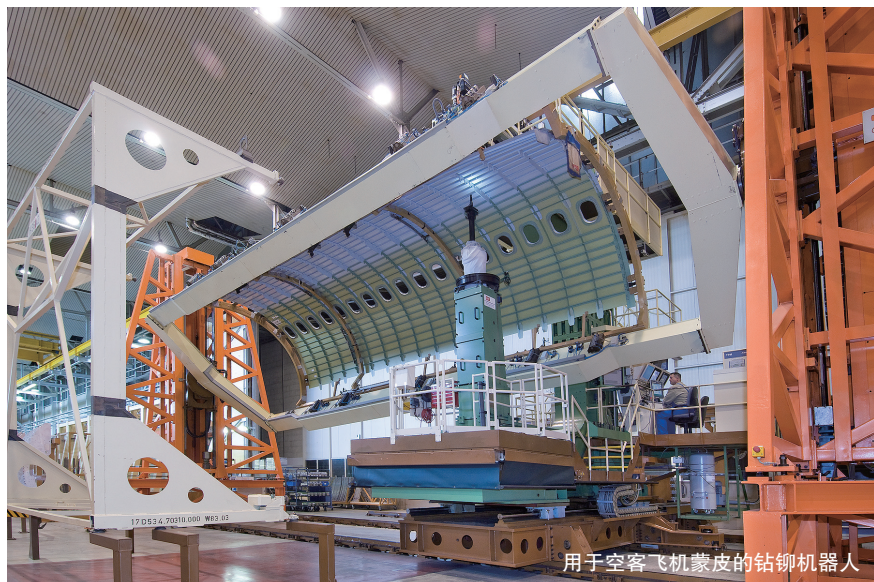
到 2014 年预计将达到 130.8 万台<sup>[1]</sup>。目前,应用工业机器人最为广泛的是汽车工业,任务跨越材料搬运传递、加工处理、测量与检测等方面。在材料加工处理方面,机器人执行切割、焊接、铣削和钻削、喷漆与表面处理、装配等任务。

在全球化的经济背景下,我国航空工业的发展面临一系列新的挑战。加强飞机结构的强度、提高飞机的性能、降低飞机的制造成本成为所有飞机生产商共同追求的目标。为了迎接这一系列挑战,必须采用新的技术、新的加工及装配方法。因此,机

器人柔性装配技术是应对这些挑战的有效途径。

飞机结构件的寿命在一定程度上





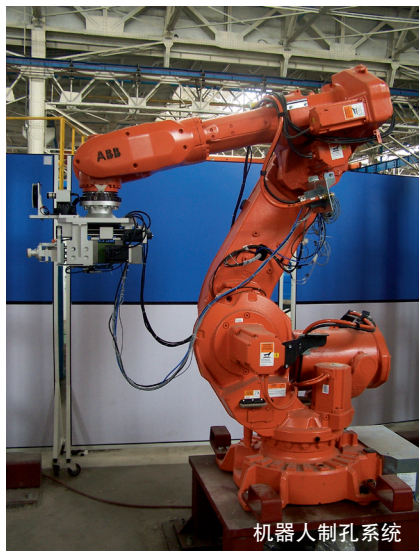
用于空客飞机蒙皮的钻铆机器人

上决定了飞机整体的寿命。为了满足飞机高寿命的要求,可以通过各种技术改善结构件连接点的技术状态,如连接孔的孔径精度、表面质量、配合性质等。在飞机自动化柔性装配技术中,采用机器人实现飞机部件乃至整机制造中的钻孔和铆接,是提高钻孔和铆接质量的有效技术途径。国外自 20 世纪 90 年代起,就已经大规模开展飞机自动化装配技术的研究。采用数字化自动钻铆装备实现飞机大型构件的装配和联接是提高装配效率和质量的有效途径,也是航空制造业的重要发展趋势<sup>[2]</sup>。

### 机器人制孔在飞机自动化装配中的应用

根据飞机结构件制造中自动化制孔的特点和要求,国外著名的飞机装配设备制造厂家生产了许多大型的面向飞机装配的自动化设备。国外运用的自动化精密制孔设备主要有 4 种:自动钻铆机、柔性导轨自动制孔系统、龙门式自动制孔系统、机器人自动制孔系统。目前已有的自动化钻铆装备多采用“C”型布局,如空客 A320 和 A400M 的机身装配系统及波音 737 和 787 的机身环铆系统等。这种为用户定制的机床设备具有大型化、高刚性等优点,但存在

质量大、设备笨重、用途专一的缺点。由于现有机器人刚度和精度相对较低、负载较小,使得传统的工业机器人在飞机装配上的应用水平较低。未来机器人需要提高精度来满足飞机工件加工的要求,需要更高的柔性来适应不同产品的要求<sup>[3]</sup>。串联机器人的刚度和精度较低,多适于壁板制孔等对精度要求不高的场合,如空客采用 KUKA 机器人建造出飞机水平侧翼上下壁板自动制孔单元。混联机器人因在不同程度上继承了串联机器人和数控机床在柔性、工作空间、速度、刚度和精度等方面的优点,越来越受到飞机制造商的关注,如 Tricept 机器人被应用于空客 A340



机器人制孔系统

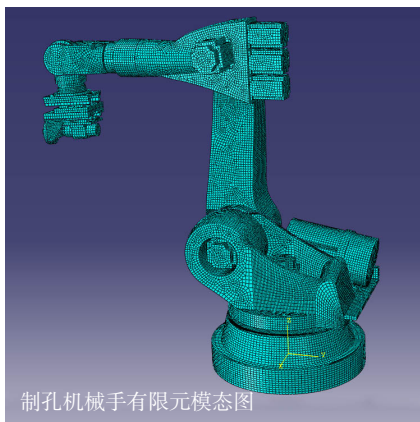
复材升降舵的钻孔和铤孔工序以及波音 777 生产的钻铆工序<sup>[4]</sup>。宝捷公司(Broetje-Automation GmbH)研发了一种新型标准关节机器人生产单元,它使用的关节臂机器人配有新型末端执行器,用于在单通道飞机货舱门内部结构中进行实心铆钉的自动钻铆<sup>[5]</sup>。

### 机械手刚度的研究

刚度是加工机器人作业单元满足加工准度和精度的重要性能指标,也是机器人研究领域的重要组成部分。机器人静态刚度的建模是静态条件下受力变形计算的基础。钻铆机器人加工状态的静态变形主要由于钻孔、铆接过程中工件与工具——机器人系统的相互作用力导致。机器人动力学则是计算动态刚度和振动特性研究的理论基础。

近年来,国内外许多学者在机器人机构刚度建模方法方面进行了大量工作,主要方法包括有限元法和解析法。清华大学汪劲松等<sup>[6]</sup>在 ANSYS 平台上,用有限元方法分析了一种 6-UPS 并联机床的静刚度,计算出并联机床在工作空间内的刚度分布。有限元法具有计算精度高的优点,但应用中需要对不同形进行网格重新划分,计算效率不如解析模型高。天津大学黄田等<sup>[7]</sup>研究了一种新型 4 自由度混联机器人的半解析刚度建模方法,该模型考虑支链构件及铰链的弹性贡献,侧重研究约束支链弯曲刚度,在 2 自由度并联机构位置逆解分析和变形分析基础上,基于全变形雅可比矩阵建立静刚度半解析模型。燕山大学 Hu Bo 等分析了一种 2 (SP+SPR+SPU) (一种 2 自由度串联的并联机构)机械手,构造了全局刚度矩阵,并与有限元解析进行了对比<sup>[8]</sup>。

国外在机械手静刚度解析法建模方面,Pashkevich 等分析了具有被动连接的并行和串行机械手的刚度,



制孔机械手有限元模态图

介绍了一种具有被动连接的非线性刚度模型,该模型采用数值方法计算多体结构的笛卡尔刚度<sup>[9]</sup>。Majou 等研究了 3-PRPaR 含欠约束主动支链的并联机构的刚度建模问题,但所建模型仅考虑了支链在驱动方向上变形对其末端刚度的影响<sup>[10]</sup>。Pashkevich 等基于多维质点参数模型,对具有柔性连接和过约束的并联机械手,采用虚拟弹簧代表关节的柔性和质点间的协调与耦合,并采用了可用于计算过约束结构的有限元连接刚度计算方法<sup>[11]</sup>。

对于末端执行器为钻削加工主轴与刀具、铆接工具的机械手,其加工状态若采用闭环控制制动器动态输出主动力以平衡加工载荷,则由于输出存在的响应滞后和闭环测力传感器的误差等因素,难以保证加工位置上的力平衡状态。因此当前多采用整个机械手除末端执行器之外的构件处于静止状态,所有关节处于机构的锁定状态,整个机构的外载荷来源于加工过程产生的具有周期性的钻削力或铆接过程的具有冲击特点的铆接力。对于这种状态,当前发表的关于机器人静刚度和动力学分析文献尚不多见。

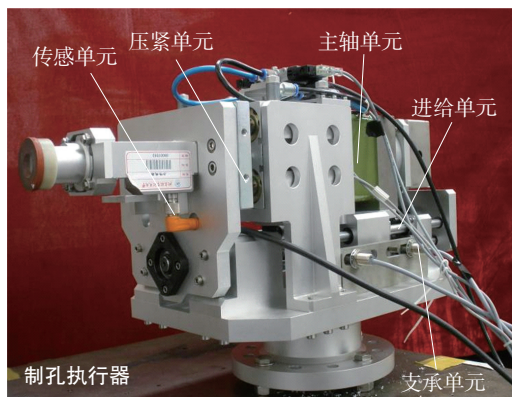
### 钻削力为外载荷的机械手动力学研究

在钻削力建模方面,国内倪军等建立了钻头切削刃的数学模型,并通过钻头切削刃上任意微元的几何关

系、运动关系、受力关系及切削原理,建立了钻头任意形状切削刃的受力预测模型<sup>[12]</sup>。师汉民等根据钻头前刀面的数学模型,应用平面表像法理论建立了计算曲线刃钻头主切削刃各点在不同参考系下的工作切削角度(包括工作前角、工作刃倾角、工作主偏角等)的像图<sup>[13]</sup>。肖思来等以无瞬心包络原理为基础,应用 B 样条曲面插值算法,建立了深孔麻花钻变参数螺旋槽的数学模型三维实体几何模型<sup>[14]</sup>。国外 Norberto LOPEZ de Lacalle 等建立了铝合金 Al 7075-T6 钻削工序的轴向推力和扭矩的数学预测模型,并对切削力系数随刀具几何以及切削速度等工艺参数进行变换调整<sup>[15]</sup>。Paul 等则以最小化钻孔中的轴向推力和扭矩为目标,研究了麻花钻头几何的优化原理,对 3 种常用麻花钻:锥面钻头、Racon 钻头和螺旋钻头进行了优化<sup>[16]</sup>。

当前对机器人动力学的研究主要集中在制动器主驱动力对系统动力学特性的影响方面。陈志煌等讨论漂浮基闭链双臂空间机器人抓持系统的动力学建模与控制问题,利用拉格朗日方法和牛顿—欧拉法,分别建立了双臂空间机器人及抓持负载的动力学模型<sup>[17]</sup>。章定国等研究由柔性杆和柔性铰组成的空间机器人的动力学问题,把柔性铰简化为线性扭转弹簧,采用假设模态法表示杆件的弹性变形,运用 Kane 方法对全柔机器人进行动力学建模<sup>[18]</sup>。Lopes 等从广义冲量的定义出发,得到了具有移动平台的 6 自由度并行机械手的动力学模型,该模型统一了机械手平台在静止和移动状态的动力学描述<sup>[19-20]</sup>。Abdellatif 等提出了一种 6 自由度并行机器人动力学定义的自包含方法,对周期性激振方法进行了改进,以实验方法来识别系统的结构属性<sup>[7]</sup>。

机械手动力学建模中,关节的质量、刚度、阻尼等属性是整个动力学模型中的重要组成和技术难点。机械手中的连接(如曲柄、连杆等)一般可以用杆模型、梁模型,或用有限元方法来抽象。但对于关节,不管是主动关节还是从动关节,当前的动力学建模往往以弹簧和阻尼单元来简化和抽象,但这种简化的误差本身可能大于杆和梁等模型的误差。柔性关节和连接的阻尼的建模必须以合理的假设为前提。Zhao Yang 等考虑了机械手关节的间隙,采用非线性的弹簧-阻尼模型对间隙的接触动力学进行抽象,以库仑摩擦模型考虑间隙中的摩擦效应,并建立了关节具有间隙的机器人系统动力学公式<sup>[21]</sup>。Mohan 等结合理论推导和实验数据分析,建立了具有刚性和柔性连接的机器人系统动力学模型,并考虑关节阻尼和柔性连接结构阻尼特性对模型进行了改进,通过实验数据的分析来确定阻尼系数<sup>[22]</sup>。Diaz-Rodriguez 等对具有弹簧和阻尼特性的 2 自由度机器人致动器进行建模,由于模型的高度非线性,采用了一种非标准的有限差分法对动力学模型进行求解<sup>[23]</sup>。



### 钻削过程颤振的研究

颤振则是切削加工系统中发生的刀具和工件之间的相对振动,是由于切削力随刀具进给的周期性变化(再生颤振)等原因造成。作为切

削加工系统影响生产率和加工质量的一种主要因素,目前发表的切削加工机器人颤振研究方面的文献尚不多见。当前能检索到的文献主要有 Poignet 等从机器人机械手形式加工机床的控制问题出发,对刚体结构、弹性体结构的动力学问题,以及制动器的动力学和饱和度(Saturation)进行的研究<sup>[24]</sup>。Pan 等则建立了用于铸造毛坯件预加工机器人的颤振机理分析的切削力模型和机器人结构模型,并认为机械加工机器人颤振的主要机理为模态耦合,完全有别于通用 CNC 机床上的再生颤振机理<sup>[25]</sup>。

尽管加工机器人动力学研究,特别是加工机器人在加工状态(这时切削力为外力的主要形式)动力学的研究和加工机器人切削颤振研究方面已发表的文献非常有限,但颤振研究在传统机床结构和切削工序,如车削、铣削、磨削等方面,已经经历了近 50 年的较为系统和全面的理论探索和加工试验研究,发表了大量的论文,并一直是加工制造领域的研究热点<sup>[26]</sup>。

当前钻孔过程切削颤振的研究集中于再生切削机理。Roukema 等在切削力解析建模的基础上,给出了考虑横向位移、轴向位移、轴向角位移的钻孔过程三维动力学模型,并分别采用时域方法和频域方法,对横向颤振、横向和轴向角振动特性进行了研究,并求解颤振稳定域<sup>[27-28]</sup>。钻孔过程中的过程阻尼是影响切削系统振动特性和颤振趋势的重要特性,发生于刀具后刀面和工件的相互作用(接触和摩擦)<sup>[29]</sup>,是阻尼颤振机理分析的基础。

当前的切削系统动力学控制方程,包括时域和频域 2 种形式。频域形式控制方程的核心是传递函数,由于系统阻尼等理论分析的困难,当前研究主要集中在采用锤击实验方法获取系统的传递函数特性。由于机床—主轴—刀夹—刀具系统组合的

多样性,系统被分解成为不同的子结构,应用子结构法<sup>[30]</sup>,或称子结构模态分析,通过子结构的动态特性来耦合系统的动态特性,由系统的动态特性亦可分解或解耦出子结构的动态特性。子结构法在切削系统中也得到了应用,用于钻头—机床系统的轴向转动、轴向位移和弯曲的柔度(Receptance)的预测<sup>[31]</sup>。

## 结束语

采用机器人进行飞机结构件自动化钻铆工艺过程可以提高制孔、铆接质量,从而提高飞机制造装备的柔性和自动化程度,并保证飞机使用寿命,最终提高飞机制造的总体水平。国内外针对机器人结构,特别是关节式机械手的静刚度和动刚度均进行了较为系统深入的研究,研究的侧重是以制动器主动力作用下结构的刚度以及对机器人的自动控制为目标;而以加工机器人为研究对象,针对末端执行器所承受切削力、铆接力等为主要外载荷特征的动力学研究相对不多见。加工颤振是影响加工质量和加工系统寿命的主要因素之一,以传统机床结构为对象的加工颤振研究较为成熟,但相对加工机器人颤振方面的研究仍处于起步阶段。

一方面,当前的机器人动力学和机床切削颤振方面的研究可以为相关研究提供相应理论基础、模型和算法、实验方法等方面的参考;另一方面,在钻铆机器人工程应用和加工状态动力学研究、切削颤振研究等方面仍然存在理论、建模和实验技术方面的欠缺。因此,需要深入分析和建模切削力的解析表达以及加工机器人加工状态的刚度特性,并在此基础上进行加工机器人制孔过程颤振机理的研究。

## 参考文献

[1] Robotics. IFR International Federation of Industrial Robot Statistics [EB/OL] 2011[2012-

1-13]. <http://www.ifr.org/industrial-robots/statistics/>.

[2] 王仲奇,殷俊清,康永刚. 飞机自动钻铆仿真技术. 航空制造技术, 2008(20): 44-47.

[3] 邹方. 飞机装配迎来机器人时代. 航空制造技术, 2009(24): 34-37.

[4] Bouchard P O, Laurent T, Tollier L. Numerical modeling of self-pierce riveting—from riveting process modeling down to structural analysis. Journal of Materials Processing Technology, 2008. 202(1-3): 290-300.

[5] 邓锋. 采用标准关节机器人系统对飞机货舱门结构的自动钻铆. 航空制造技术, 2010(19): 32-35.

[6] 李育文,张华,杨建新,等. 6-UPS 并联机床静刚度的有限元分析和实验研究. 中国机械工程, 2004. 15(02): 112-115.

[7] Abdellatif H, Heimann B. Experimental identification of the dynamics model for 6-DOF parallel manipulators. Robotica, 2010. 28: 359-368.

[8] Hu Bo, Lu Yi, Tan Qing, et al. Analysis of stiffness and elastic deformation of a 2 (SP+SPR+SPU) serial-parallel manipulator. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2011. 27(2): 418-425.

[9] Pashkevich A, Klimchik A, Chablat D. Enhanced stiffness modeling of manipulators with passive joints. Mechanism and Machine Theory, 2011. 46(5): 662-679.

[10] Majou F, Gosselin C, Wenger P, et al. Parametric stiffness analysis of the orthoglide. Mechanism and Machine Theory, 2007. 42(3): 296-311.

[11] Pashkevich A, Chablat D, Wenger P. Stiffness analysis of over constrained parallel manipulators. Mechanism and Machine Theory, 2009. 44(5): 966-982.

[12] 练章华,倪军,林学文. 任意形状钻头切削刃的受力预测模型. 中国机械工程, 2001. 12(06): 616-620.

[13] 熊良山,陈永洁,师汉民. 基于平面表像法的任意刃形钻头切削角度的建模与测量. 工具技术, 2007(12): 42-46.

[14] 肖思来,周志雄,左小陈,等. 深孔麻花钻变参数螺旋槽的数字建模研究. 中国机械工程, 2011. 22(21): 2555-2559.

本文共有参考文献 31 篇,因篇幅所限,未能一一列出,读者如有需要,请向本刊编辑部索取。

(责编 亦非)