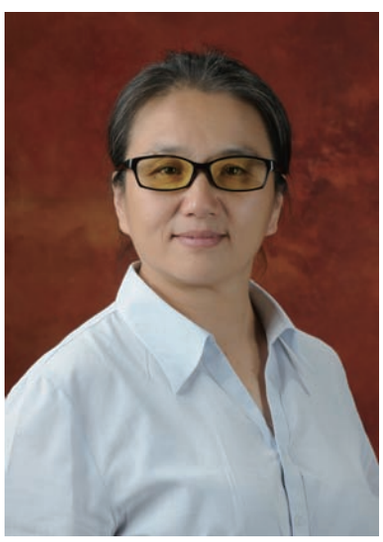
航空先进制造技术与制造装备的发展与思考

■ 北京航空制造工程研究所 （100024） 张 媛 王彦蕾



北京航空制造工程研究所研究员、
中航工业装备中心办公室主任 张媛

目前，美国的工业互联网，德国的工业4.0，法国的未来智能工厂计划，欧盟的智能制造系统，英国的智能制造计划、高价值制造计划以及《中国制造2025》等概念铺天盖地，世界工业革命到了发生重大变革的转折点，而航空制造业将是这次工业变革中的领头羊。

航空强国十分重视航空专用工艺设备的发展，美国采取了包括“MANTECH”计划等一系列措施发展先进制造技术和装备，欧洲委员会在《欧洲航空：2020年前景》报告及多个《五年框架计划》研究开发计划中，极重视基础装备技术研究。F－22、波音787和A380等均是先进航空工艺装备打造出来的典范。

航空领域制造技术及装备发展趋势

1. 基础制造装备定义

目前关于“基础制造装备”的定义并不是很明晰，但主要方面描述的是用于航空、航天、船舶及能源等产品加工、检测、装配、试验以及包装运输过程中所需的专门设计制造的具有独立运行功能的设备和工装，具有适用于零件精度高、材料加工难度大、加工工艺复杂的航空产品制造的特点，是集成较多先进制造技术、承载制造工艺的中高端装备和重大技术装备。

“基础制造装备”包括高档数控加工、表面工程、特种加工、焊接、塑性加工、装配、复合材料构件制造及精密/超精密加工等先进制造技术领域的设备以及相关产品的试验、测试、计量、检测设备，同时还包括针对高端制造业产品零部件研制生产而专门设计制造的型架、夹具、刀具、模具、量具、检具及钳工工具等工艺装备。

用于航空制造领域的“基础制造装备”代表了先进国家的基础工业的水平，包括：航空装备（飞机、发动机、机载）研制和生产急需的关键设备；航空制造中技术先进、研制难度很大、需自行研制的设备。具体指：用于航空产品生产的数控切削加工设备、精密及超精密加工设备、高能束流加工（特种加工）设备、热加工及精密成形设备、先进连接设备、先进装配设备及复合材料构件制造设备等。

产品的零部件大多数需要经过加工、成形和连接等工艺过程。可以说航空基础制造装备是先进制造工艺技术的载体，已成为航空产品制造中的主要需求。

2. 航空领域制造技术及装备发展趋势

（1）数控加工工艺转向智能加工工艺的实现。传统数字化加工过程是根据设计模型和工艺要求确定加工工艺及程序，基于空间和时间的确定性关系来完成产品制造，加工状态是依靠人员监控、事后检测来确认的，难以实

时掌握加工过程中工况变化并及时调整，导致航空产品零部件质量一致性不稳定、表面质量状态波动大。智能加工工艺将形成一种实时优化调整模式，制造过程中增加对加工过程、时变工况的在线监测，利用智能化技术对获取的加工过程状态信息进行实时分析、评估和决策，实现对加工过程的自主学习和决策控制；通过自主学习形成工艺知识库，支持工艺设计与程序设计过程，实现工件加工工艺的自主决策设计和优化。

（2）传统数控装备向智能装备及智能制造单元转变。传统数控装备是按确定的空间关系和程序逻辑运转的，随着数控系统计算处理能力的不断提升和功能部件不断发展完善，数控装备的加工效率、稳定性、灵活性及信息处理能力有了极大的提高，基于工况的自主处理能力日趋增强。

航空制造领域的智能装备及智能制造单元主要包括智能机床、智能机器人、智能控制装置与系统、传感识别与信息采集装置和智能物流系统等，能够对制造过程中运动、功率、转矩、能量和信息等状态进行实时监测，并实现基于规则的自主决策与自适应控制。

（3）智能制造系统将是航空先进制造技术的具体体现。航空产品制造包含一系列工艺过程和工序过程，原材料进入由工艺装备、经过不同的工序或工艺处理等集成控制系统、物流系统和工作人员等组成的全价值链制造系统，形成符合设计要求的产品。

以数字化技术为基础，以集成控制技术为核心，引入智能处理决策功能，构建出基于智能化装备、智能化工艺、传感网络、智能决策处理系统及人机互联的智能化制造系统，使制造智能由个体智能跨越到整体智能，提升大数据量、高自动化环境下人们对制造数据、加工状态和调整决策的掌控能力

依据航空产品类型和主体制造工艺不同，智能制造系统范畴而有所差异，可分为切削加工、钣金成形、复合材料构件制造和整机装配等不同类型，但他们均应具备智能化工艺设计与优化、工艺装备功能数据、制造数据、产品测量数据的采集与知识库的建立、数据分析与信息流的配置、传感网络与实时处理、智能化运行管控与在线学习和工艺流程优化等基本能力。

航空领域先进制造技术应用案例

1. 数字化制造技术

数字化是基于数字模型定义的协调技术，由数字化制造理念、方法和技术生产航空产品。基于数字化互换协调过程的3个阶段（设计阶段、加工阶段和装配阶段）， 数字化制造技术的内容包括：定义数字化生产线和数字化车间；扩大数控机加范围，增加大件、高效数控加工；对钣金、复材构件、焊接和检测等采用数字化技术手段和工艺；减少零部件工装，发展柔性工装和数字化装配定位技术，取消原用装配精加工台。要求制造时间缩短66%，工装减少90%，制造成本降低50%。

2. 复合材料制造技术的应用

复合材料构件自动铺放技术经过20世纪90年代的蓬勃发展，在成形设备、软件开发、铺放工艺和原材料标准化等方面得以深入发展。自动铺带技术及设备已成为大型机身机翼壁板铺层的解决途径，如机翼板、副翼、垂尾及平尾蒙皮等，丝束铺放技术及设备已成为飞机大曲率、异面体复材铺放的解决途径，如机身部分及其他全曲面结构 ，用于复合材料构件制造的多轴自动铺带技术、丝束铺放技术及设备正在通过飞机制造业的自动化改变着全球航空业的未来。

目前复合材料构件自动铺放技术及自动铺带设备发展到第五代产品。带有双超声波切刀切割系统和在线检测系统的10轴铺带机已经成为自动铺带系统的标准配置，铺带成形质量显著提高，铺带效率已是手工铺叠的数10倍。目前，欧美将自动铺带技术应用于Boeing 787（中央翼盒、主翼蒙皮、尾翼和机翼）、A400M（机翼、翼梁）、A350 XWB（机翼、蒙皮和中央翼盒）等型号飞机。MTorres公司两台TORRESFIBERLAYUP AFP铺放设备用于于生产787机翼和尾翼、A350前翼梁和后翼梁等全复合材料构建，铺带速度高达60m/min。

美国的CINCINNATI、INGERSOLL和Electro Impact，法国的FOREST~LINE，西班牙的M.TORRES等，这些公司研制了很多种型号的纤维带铺放机和纤维丝束铺放机分散在世界各地的工厂，用于为大型客机生产各种型面的复合材料构件的整体化

制造。

复合材料构件固化技术与超声检测技术应用趋于成熟。当纤维铺放设备完成零件铺放以后，需要将零件放在高温高压的热压灌中，固化8～10h，对于这些超大型的复合材料构件就需要巨大的热压灌。三菱重工用于生产787机翼的热压罐（见图1）为131ft（1ft=0.304 8m）长，直径26ft。三菱的翼盒是在一个长102ft心轴上加工的。该心轴距离地板很高，以致于不能完全看到翼盒的外形，目前国内也都处于空白状态，这为我国将来大飞机的生产提出了挑战。



图1　世界上最大的热压灌之一
（TEC公司生产，用于787机翼）

当完成固化后，复合材料构件还要进行超声检测等，来发现是否存在铺层缺陷，保证构件的质量，这时就需要大型的超声检测设备。

3. 数字化柔性装配技术的应用

数字化装配技术的发展历程始于波音公司，波音公司最先尝试并探讨了改变传统装配方法的途径：首先在工装设计中采用基于装配孔的骨架定位装配技术简化工装，之后应用柔性工装实现柔性化装配，然后在柔性工装基础上增加自动化设备集成为自动化装配系统，最终形成移动生产线，使飞机的装配技术发生了革命性的变化。

装配系统一般由加工设备、钻铆设备、执行机构、柔性工装、测量设备及搬运设备等构成，由供应商进行系统集成，形成集成化的柔性装配系统，通过“交钥匙”的方式提供给制造商，提升了航空专用装备供给的层级。

（1）数字化制孔单元与对接设备。在国外飞机柔性装配系统中的装配单元主要包括制孔单元、铆接单元、螺栓安装单元、紧固件插入单元、密封胶注胶器、孔强化单元、铆钉铣平单元及自动送料单元等，检测单元包括孔探针、同步照相机、法线传感器、夹层厚度检测单元、激光视觉单元和激光跟踪定位单元等。

（2）自动化装配系统。世界航空发达国家的飞机自动化装配技术，已从由单台数控自动钻铆机和数控托架组成的自动钻铆系统（见图2）向由数控装配工装、模块化加工单元、数控定位系统(包括机器人)、自动送料系统和数字化检测系统、离线编程与仿真系统等组成的的自动化装配系统发展，大部分基于CATIA平台进行设计，保证了装配系统与飞机产品的数字化协调。当自动化装配系统集成了柔性装配工装，能适应多规格、多种类飞机产品的装配时，就发展成了更高一级的柔性装配系统，包括机翼壁板柔性装配系统、翼梁柔性装配系统、复合材料尾翼柔性装配系统、机身壁板集成单元、机器人自动装配系统及机身环铆自动装配系统等。



图2　自动钻铆设备
（正在装配47段、48段）

4. 自动化辅助运输设备

波音、空客等航空公司在飞机部件对接过程中大量采用气垫运输技术，该技术与先进的测量定位技术、数控技术相结合，实现了大型飞机部件在对接过程中的平稳运输，大大提高了飞机装配的工作效率和质量。

5. 自动化柔性装配生产线

飞机柔性装配生产线最早出现在民机产品的装配中，波音公司借鉴汽车工业中的洗车概念，建立了第一条脉动式飞机装配生产线（见图3）。脉动式生产线主要优势是高精度、高效率，并通过合理的生产线布局和节拍控制满足不同产品在同一生产线上不同产量的变化需求，提高高端装备设备利用率，降低生产成本。



图3　B787脉动式飞机装配生产线

世界各国为制造业发展所做的准备

由美国GE等企业提出在工业领域实现数据流、硬件和软件的智能交互，实现系统、设施、资

本运营的优化，工业互联网概念应运而生， 具体表现在将互联网作为当前信息化的核心，推动移动互联网、云计算、大数据和物联网等与现代制造业结合，推动两化融合深度发展，通过3个步骤实现其效能：工业数据的获取、工业数据的分析和调度执行，分别对应于物联网、云计算与大数据和专网通信，这是工业互联网的关键元素。

2012年3月，作为“振兴制造业”战略的重要一环，美国政府宣布启动“国家制造创新网络”计划，该计划由先进制造国家项目办公室协同国防部、能源部、航空航天局、商务部以及国家科学基金等联邦政府部门共同负责实施，以公私合营的方式，建设15～45家“制造创新机构”，形成覆盖全美的制造创新网络。

2014年9月，数字设计与制造创新机构提出先进制造企业 、智能机器、先进分析及赛博物理系统安全等四大技术领域推进全数字化与智能化，并且给出了当前研究重点。

2014年12月，美国国家制造创新网络启动了第8个创新机构即“智能制造创新机构”的竞标，该机构将由能源部牵头组织建设，并为智能制造下了一个崭新的定义：智能制造是先进传感、仪器、监测、控制和过程优化的技术和实践的组合，它们将信息和通信技术与制造环境融合在一起，实现工厂和企业中能量、生产率和成本的实时管理。

以西门子为代表基于德国雄厚的制造业为基础，寄希望以此定义第四次工业革命，将CPS（虚拟网络—实体网络系统技术）一体化应用于制造业和物流业，目的是保持本国的制造业竞争力，提高资源利用率，提出工业4.0，打造智能化工厂。

2015年中国政府提出《中国制造2025》，将信息技术与制造技术深度融合的数字化、智能化制造作为发展主线，以未来十年为发展周期，目标是驱动制造业的转型升级，推动中国由制造业大国向制造业强国转型。

美国依靠强大的信息技术，将大数据采集分析、云计算等计算机互联网技术应用到工业制造领域，打造“工业互联网”，以此战略保持其工业强国的地位。德国凭借雄厚的工业制造、工业自动化基础，与计算机互联网融合向智能化制造进军，提出工业4.0的概念。那么，中国以什么为依托，实现《中国制造2025》的宏伟蓝图呢？

结语

国外先进的航空专用装备的工程应用满足了飞机制造的高效和无缝连接的高质量要求。全自动化集成控制技术的研发代替人工工艺流程已走上应用舞台，并取得了重要进展。

伴随着中国大飞机项目不断扩大，对生产质量的要求越来越高。中国在先进制造技术和装备上的需求会越来越多，中国的飞机制造商的需求尤为突出。

国外先进航空制造厂商已经就中国航空市场做好准备，一方面将通过提供其先进的技术和设备来满足中国客户的需求；另一方面也将广泛寻求多层面的合作，将其先进技术与中国富有竞争力的生产成本紧密结合起来，从而获得更大的利益，并占据了90%以上的国内航空重要市场。各国的目的相同，但基础不同，我们做好准备了吗？**MW**

（收稿日期：20150912）

海克斯康计量赞助2015年圣保罗世界技能大赛

2015年8月11～16日，来自60多个国家的选手齐聚圣保罗，参加圣保罗世界技能大赛，在超过45个不同的竞赛项目中展开角逐。海克斯康计量是本届世界技能大赛的官方金牌赞助商，将为竞赛者提供部分硬件和软件方案的支持。参赛者可利用海克斯康计量的三坐标测量机INSPECTOR BR 686检测零部件的高精度3D尺寸，此外，复合式影像仪Optiv Performance以及全球最知名的测量软件PC-DMIS，也将在比赛中帮助参赛者完成他们的挑战。对该赛事的支持体现了海克斯康计量对职业教育的承诺。

