



中航工业制造所所长

航空专用装备 任重而道远

Importance of Special Equipment for Aviation Industry

中航工业北京航空制造工程研究所 张 军

随着近些年国家在高端装备制造领域投入的不断加大和企业对自主创新能力的培养,我们已经在一些高端装备制造领域有所突破。并且,随着技术积累的不断加深和创新资源的逐渐成熟,我们的突破点会越来越多。全面突破西方国家的技术壁垒,进而引领世界先进制造技术也不再是遥不可及。

航空工业已毋庸置疑地成为世界强国的战略性产业,不但是独立自主巩固国防的重要基础,也是带动国民经济发展的主要产业。先进工艺装备是航空工业发展的主要基础保障条件,是航空武器装备制造的支柱,是国家核心竞争能力和国防实力的体现。对比世界航空工业强国,面向我国航空工业的未来需求,我们的航空专用装备发展任重而道远。

航空专用装备在国家发展中的重要战略地位

世界航空强国都十分重视航空重大专用工艺设备的发展。近十多年来,美国采取了一系列措施发展先进制造技术和航空专用装备,提出了“国家先进制造计划”,计划安排47亿美元的投资,以振兴国家制造业的基础建设。在美国国家关键技术中

明确将柔性计算机集成制造、智能加工设备、微米级和毫米级制造以及系统管理等4项属先进制造领域的技术纳入其中。美国国防部从1996年开始针对武器装备的制造逐年提出“MANTECH”五年计划,在金属材料、复合材料加工制造及先进制造企业建立等方面,建立了一整套较为完善的规划、协调、监督、实施、共享双赢的制造技术、装备的研发体制,将政府、军方、科研机构及承制商有效地结成了利益整体,通过专用新设备的研发,实现了先进制造工艺,从而有效地促进了美国三军武器装备的更新换代速度。

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,将很大一部分资金投入到了设计与制造以及有关支撑作用的信息技术和基础技术装备研究

中(2006年达到10亿欧元)。

2012年,世界空军武器装备在战斗机、轰炸机、支援保障飞机、无人作战飞机、新概念飞行器和机载系统等领域均取得了重要进展,继续呈现出信息化、智能化、远程化、无人化、绿色环保和微型化等多样化发展特点。先进战斗机装备与技术继续全面发展,以美国F-35和俄罗斯PAK FA为代表的第五代战斗机研制计划取得显著进展,并开始立项研制新型轰炸机;美欧无人作战飞机计划取得重大进步,美军开始接收F-22战斗机的新改进型飞机;F-35也将是未来美军的主力机型,空军、海军和海军陆战队均计划装备,美国和日本继续推进第六代战斗机探索计划。

2012年3月美国总统、国防部牵头筹建首个美国制造创新研究所,



F-22 3D投影装配系统

美国国防部启动美国首个制造创新研究所的筹备建设工作。该研究所将通过开发、验证和评估增材制造技术领域的产品和工艺技术,建设支持先进制造的设施,形成集中而又开放的能力。

正是由于注重航空制造装备研发,直接促成了先进制造思想的实现,西方航空先进国家的技术得以持续高速发展,飞行器不断更新换代,并以此作为在国际市场竞争中保持优势的手段。

我国航空工业已走过 60 年历史,航空制造业得到了很大发展。进入 21 世纪以来,随着计算机技术、信息技术的发展,航空制造装备已进入高度自动化、智能化时代,新一代的大型、复合型、高效、高速数控制造设备、柔性制造系统、FTL 自动线已代替落后的传统设备。

航空制造业位于整个制造产业链的顶端,是最先进、最前沿的工艺设备集中的高技术行业,航空专用装备的发展将带动国防工业的发展。与发达国家相比,我国的装备制造基础依然落后。为此,近十多年来国家高度重视装备产业的发展。大型飞机、载人航天与探月工程及高档数控机床与基础制造装备被同时列入《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006-2020 年)》确定的 16 个重大科技专项。国务院也于 2010 年发布了《国务院关于加快培育和发展战略性新兴产业的决定》,将高端装备产业列为国家十二五规划中的重点

扶植产业之一。可见提升装备制造水平已成为国家坚定的意志和行为。

中航工业集团公司十分关心航空专用工艺装备的发展,董事长林左鸣曾指出:“把航空工艺装备自主化发展这件

事办好之时,可能就是我国航空工业全面振兴之日。”集团公司下属各部门为此积极运作,研究实施方案,在工作中注重高端制造装备产业的发展,在大力开展投资建设领域装备国产化工作的同时,组织各方力量研究解决高端航空制造装备的自主化发展的途径,以提升集团自主创新能力和核心竞争力。

航空专用装备发展的国际现状

从总体上看,世界航空制造技术及航空专用装备的发展现状及趋势可以归纳为以下几个方面:

(1) 精度高、稳定性强——机械加工朝着高效数控加工方向发展。

国外用于机械加工的航空专用装备相比于国内配置相当,但具有精度高且稳定性强的特点,加工过程中不会因为设备精度不稳定使其航空产品零件达不到相应技术要求。这主要源于国外加工装备技术成熟度高,能根据客户需求将辅助定位、测量系统、监控系统及误差补偿系统与设备很好地集成,并根据精度要求进行相应改装。此外,国外还根据机床特点,通过开发先进的误差补偿技术来提升机床利用率和精度。

美国国家制造科学中心(NCMS)的大型机床空间精度(VALMT)计划成功完成快速空间误差补偿(VEC)技术的开发并用于 F-35 零件数控加工,该计划包括波音、西门子、MAG 辛辛那提公司和

API 公司。系统专为大型和多轴机床开发,可以达到设计部门的目标:即减少确定空间补偿时的停工时间,通过一个简单的自动化过程,可以减少一天到几周,并提升机床的性能达 50% 以上, F-35 的机体加工制造中已广泛采用该技术。

钛合金加工的五坐标龙门机床越来越受到重视和应用, F-22 机械加工关键的机床是辛辛那提公司生产的五坐标龙门机床,目的是达到 F-22 零件生产标准要求。

复合材料构件加工设备应用越来越广泛。洛·马采用机床制造商 DST 公司生产的精密五轴铣床进行 F-35 复合材料蒙皮的精密铣削和钻孔加工,洛·马将这种机床称之为 FOG,即“柔性”、“高架”、“龙门”铣床。FOG 的 X 轴最大行程为 15m,用于测量位置精度的标度尺和空间补偿值的测量系统可以在机床的整个工作空间内使零部件保持足够高的精度。

民用航空机械加工装备配备的数控加工设备具有台数多、尺寸大、多龙门、多主轴、高转速等特征,其多坐标、高速、高刚性、大功率加工设备的加工效率高。如波音在民用航空制造分部配有多台 Cincinnati 27~40m 长的三轴五坐标数控自动换刀龙门铣床,主要用于飞机壁板、梁、框、肋等结构件的加工,并有多套由 5D 高速加工中心机床构成的柔性加工单元,用于波音各机型如波音 757、767、777 飞机窗口隔框、机翼盒、肋条等结构件的加工。

目前,国外著名机床制造商如美国的 CINCINNATI、ingersoll、EI,法国 FOREST-LINE、UM,西班牙的 M-TORRES、意大利 JOBS、FIDIA,德国 STARRAGHECKERT、ZMMERMANN、DST 等公司不仅为航空企业提供大型高速数控加工设备,还在复合材料构件方面提供铺放设备及飞机装配所需的数字化柔性

装配设备。

(2) 自动化程度高——飞机结构装配技术朝着自动化、柔性化、数字化方向发展。

精密柔性制孔技术在复杂的飞机结构制造中得到广泛应用和发展,包括机器人制孔系统、自动制孔系统、柔性制孔系统、并联机床柔性钻孔设备、便携式自动制孔系统(无钻孔主轴的柔性导轨小车)等。精密制孔技术可覆盖任意生产现场,实现精密钻孔,为飞机的数字化装配打下基础。

柔性工装单元具有重量轻、可移动、可重组的特点,多个柔性工装单元可通过软件系统生成柔性装配的生产线,缩短工装准备时间,实现快速制造,降低制造成本。

飞机壁板的自动装配线已用于空客 A320E4000 机翼壁板装配和空客 A340E4100, A380E4380 机翼壁板装配;飞机梁的自动装配线已用于波音 767 机翼梁的装配。波音民机机翼生产线配置了最新的 E5000(ASAT4)C-17 第 4 代自动化翼梁电磁铆接装配系统;飞机部件对接柔性装配技术解决一些与大型机体部件装配测定、定位相关的传统工艺问题,由自动化定位器、激光跟踪仪和测量辅助装配控制系统组成的飞机部件对接柔性装配系统实现了飞机机身、机翼等大部件的自动对接。

复合材料进气道钻孔(IDRD)设备解决了对 F-35 复合材料进气道的左、右和后部,以及铝框进行自动化钻孔的难题。

德国宝捷最近发布的“宝捷之魂”是将飞机装配控制和生产执行集成到一起的软件。其引入了世界范围内第一个“闭环”软件解决方案,从生产准备(离线编程)到操作运行(任务控制)再到优化(数据分析)等所有阶段对飞机生产提供全程支持。

F35 中机身装配线有 500 多个工装,80 多台设备,包括机器人钻铆、组装、自动钻铆设备等。

先进的机器人涂层系统已经用于 F-22 部装与总装喷涂,大型机器人水平方向可伸长 28foot (1foot=0.3048m),喷头可提高到 26foot,是由普惠 Waterjet 公司生产的,属于美国空军制造技术项目(MANTECH)内容。

(3) 柔性化、模块化——柔性制造系统发展迅速。

航空工业产品或零件小批量、多品种的生产需求,使国外航空专用装备供应商重视柔性化和模块化发展,无论是工装还是机床本身,或是生产线,或是制造系统都会按照产品结构和加工特点的不同,设计适用于批生产的装备和系统。

为确保 F-35 部件生产和交付的进度,BAE 系统公司在 Samlesbury 建立了一个新的先进 F-35 钛合金

柔性制造系统(FMS)用于制造 F-35 后机身零件。每套 FMS 装有 8 台大型高强度合金铣床和两台配套设备,还包括辅助保障设备。通过这些系统,可以同时生产两个钛零件,因此可以使生产效率提高 1 倍。这种能力对满足 F-35 大批量生产阶段的需求非常关键。

以德国 DST 公司的 Ecospeed F 5 轴加工中心(并联机床)为核心组建的铝合金和钛合金加工的多个柔性制造系统(FMS),提升了其高速切削的能力。其包括 3 台加工中心,2 个装载台,1 个导轨车用于把 6 个托盘运送到加工中心。

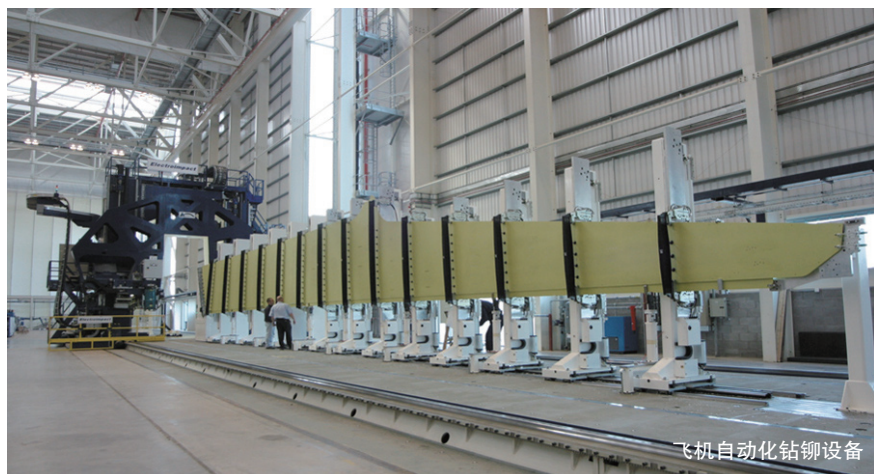
可配置模块化工装帮助 BAE 系统公司以适应 F-35 后机身和尾翼制造的众多情况,并用于 F-35 大型框架的装配。

空客德国在 A350 机身装配中采用了新型的脉冲移动线(PML)系统,它基于合理安排自动化和手工制造单元,使各制造单元之间没有间隔时间。在生产过程中,机身壁板按照装配顺序在 PML 中顺序排列,并以最小安全间距隔开。PML 的模块化提供了更高的柔性,而且 PML 的可测量性允许根据生产速度的增加而进行精确调整。

(4) 高效、低成本化——复合材料结构制造技术及装备得到迅速发展。

自动铺带技术经过 90 年代的蓬勃发展,在成型设备、软件开发、铺放工艺和原材料标准化等方面得以深入发展,软件界面更加友好,铺放效率和可靠性更高。2006 年以后,欧美将自动铺带技术应用于波音 787(中央翼盒、主翼蒙皮、尾翼)、A400M(机翼、翼梁)、A350XWB(机翼、蒙皮、中央翼盒)等型号飞机。经过几十年的发展,铺带技术在大型运输机、轰炸机和商业飞机上的应用不断增加,自动铺带机装备技术也日益完善。

目前,自动铺带机已发展到第五



飞机自动化钻铆设备

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,铺带成型质量显著提高,铺带效率已是手工铺叠的数十倍。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,丝束铺放技术及设备已成为飞机大曲率、异形体复材铺放的解决途径。

多铺放头铺带机和针对特定构件的专用铺带机是美国自动铺带机的重点研究方向;双头两步铺带(Forest-line)、多带平行铺放(M-Torres)和超声切割复合化(M-Torres)是欧洲铺带机制造商的开发重点。

欧美各自动铺带机制造商设计并制造各种类型的铺带成型设备,例如:ElectroImpact S-15 双头自动丝束铺放机制造 A350 中机身复合材料大型结构件。ES-15 可执行在线进给和切割动作,且完全双向铺倾斜且复杂的表面,进给速度达到 50.8m/min。大型机身壁板铺放速度要求高,该装备通过重新设计切割系统和优化进给、丝束路径和轴架以及机床控制系统实现。M-Torres 公司两台 TORRESFIBERLAYUP AFP 铺放设备用于生产 A350 前翼梁、后翼梁全复合材料构件,铺放速度高达 60m/min。

国际复合材料激光/超声快速检测技术已实现 C、B 和 P 扫描成像

检测,已在发动机、飞机复合材料结构检测中得到应用,如 M-Torres 公司提供的 5m 高的柱形超声检测仪,每个带有一个独立的超声扫描仪,已在 A350 机身壁板得到应用,可同时检测 A350 机身壁板的内外蒙皮。

(5)大型化、整体化——成为以钛、铝合金为代表的轻金属构件制造技术及装备的发展方向。

大型整体铝合金壁板已经成为新一代飞机提高结构效率、减少零件数量、降低成本和缩短周期的重要手段,大型整体壁板的成形技术主要有喷(抛)丸成形和压弯成形。喷(抛)丸成形技术在欧美等工业发达国家被广泛用于成形变厚度整体壁板,波音 707-777 和空客 310-340 等大中型用客机机翼整体壁板都采用数控喷丸成形方法,A380 机翼下壁板采用预应力喷丸成形技术制造。

(6)以高能束流加工设备、特种焊接设备为代表的专用装备在发动机制造中得到广泛应用。

高能束流加工解决了航空复杂构件的型腔、型面、型孔、微小孔、细微槽及缝等用常规加工方法难以解决的问题,包括激光加工、电子束加工、离子束加工、等离子加工、电火花加工、电解加工、电液束加工、超声波加工、磨粒流加工和高压水射流切割等。

特种焊接技术在飞机、发动机焊接结构件中的应用越来越广泛,为航空发动机复杂零件的设计实现工程化提供了快速方便的手段,主要包括激光焊、电子束焊、扩散焊、惯性摩擦焊、线性摩擦焊、离子弧焊、真空钎焊和真空电弧焊等。

相应的包括电子束加工设备、电子束焊设备、激光焊接

设备、电解加工设备、搅拌摩擦焊设备、线性摩擦焊设备、快速成型设备等在航空领域应用得到迅速发展。

(7)数字化、集成化、专业化已成为国外航空专用装备的发展方向。

数字化制造技术成为提升航空工业的重大关键制造技术。包括数字化生产线和数字化车间,要求扩大数控机加范围,增加大件、高效数控加工;对钣金、复材构件、焊接、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。

集成化成为航空专用装备供应商的亮点。国外航空产品装配中,制造商都会在专用装备供应商的支持下建立起集成化的装配系统,这些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、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。

专业化成就航空专用装备供应商、航空产品制造商新的合作模式。从国外航空专用装备的发展来看,其供应商以专业化发展为宗旨,特别专用的装备则由需求方向供应商直接提出需求,由供应商自行研制或采取需求方与供应商合作研制模式。这种模式的形成是以国外先进国家具有坚实的工业基础能力为前提的,也就是说,国外的工业装备技术产业发展较为迅速,能够满足航空产品结构大型化、微型化、复杂性、精密化等需求。

此外,从目前航空产品制造商使用的专用装备来看,虽然有些供应商不仅从事数控机床制造,也会从事复合材料的铺丝或铺带机制造,如美国辛辛那提公司、英格索尔公司等;但随着航空产品生产的自动化、集成化水平的提高,其供应商的专业化程度也随之提高,如海克斯康公司、API 公司、法如公司的激光跟踪仪,Forest-line 公司和 M-Torres 公司成



图 1 A350XWB 机身自动铺带机

为行业内受到认可的复合材料铺丝系统专业供应商。

国内航空专用装备之路 任重而道远

我国于90年代末和本世纪初开始引进和应用高速数控机床,在航空企业中首先应用,通过国际合作和消化吸收,现已积累了一定的经验,取得了较好的应用效果。经过多年努力,特别是“十五”、“十一五”计划的成功实施,我国在航空重大专用工艺设备制造技术方面已取得明显进步,但与先进国家相比还存在一定的差距。

当前存在的主要问题是国内制造的航空专用设备数控化水平偏低,绝大多数航空重大专用工艺设备依赖进口,相关的数据库和软件几乎全部依靠国外机床或工具供应商提供,以至于影响引进设备作用的充分发挥。

在高效数控切削加工设备方面,国内航空工厂高档数控机床的配置大多数与国外航空工厂相当,初步具备大型飞机机翼、机身铝合金整体壁板结构件加工能力,航空制造业正在规划实施航空飞机数字化制造工程和千台数控设备增效计划,基本解决了常规数控加工技术和高效数控加工技术,基本满足机身结构梁、筋、肋、板、框、滑轨、接头等加工需求。但大多数高档数控设备仍然来自于国外设备制造厂商提供。

钛合金超塑成形/扩散焊技术已在多种机型的结构件制造上得到应用,但超塑成形、钣金精密成形等大型数控设备还主要依赖于进口。国内的超塑成形设备还有待于进一步研制。

激光焊、电子束焊、搅拌摩擦焊在大型壁板、框、鼓筒、机匣等飞机、发动机零件及其他行业产品生产中的应用越来越广泛;目前国内成功研制了电子束焊接设备,高、中、低压真空室电子束焊机的技术基本成熟,并已形成系列化产品,电子束焊接技

术已成功应用于主承力框的焊接,并实现交钥匙工程。

大型强力旋压设备属国外禁运,中航工业制造所已研制多台卧式三坐标数控大型旋压机及两台(70t、100t)大型立式强力旋压设备,并推广到航天领域。

搅拌摩擦焊技术及设备已成功应用于飞机结构、航天、船舶、高铁的制造;常规氩弧焊、低应力无变形焊接技术、真空钎焊已用于发动机生产中;摩擦焊(惯性、搅拌、线性)、扩散焊、SPF/DB(超塑成形/扩散连接)等新工艺已开始部分应用。

中航工业制造所已能提供喷丸成形技术设备及热成形设备,喷丸成形技术已用于实际生产,支线客机、大型客机的机翼壁板预应力喷丸成形技术已处于国际同类技术先进水平,应用面依旧有限。

近30年来,蜂窝芯材制造专用设备研制方面已基本完整配套,开发了清洗、涂胶、固化、拉伸成形、片切、铣削和检测设备等,但设备的精度和自动化程度与国外相比有较大差距。

机械连接设备(包括机体装配)等大型构件装配技术方面,先进技术应用较少,特别是数字化和自动化技术处于较低水平,严重制约着飞机产品制造技术水平的提高。虽然数字化制造技术在国内航空企业中发展很快,装配方面已采用自动钻铆技术,柔性装配技术受到广泛关注,且目前正在开展柔性工装单元、加工单元、测量单元及梁、壁板、



五坐标数控龙门铣床

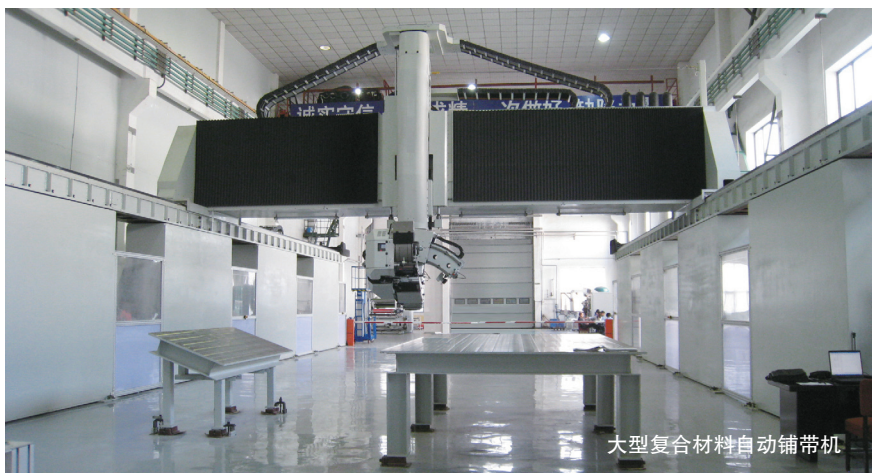


大型数控强力旋压机

机身、机翼、总装对接柔性装配技术研究,但国内自动钻铆设备托架、电磁铆接的生产应用与国外的差距很大,不能满足高性能航空武器装备研制和生产需求,相应飞机结构装配技术所需自动化装备几乎全部来自国外制造厂商。

国内复合材料制造技术已具备缠绕成型、自动铺放成型(铺带、铺丝)、拉挤、编织、缝合技术及设备等初步应用能力。国内某些主机厂也引进自动铺带设备,但应用情况不佳,目前国外对我国航空企业引进复合材料自动铺带设备高度关注,进口先进的复合材料铺放设备遭遇禁运,已经购买的设备由于软件应用及铺放工艺问题处境尴尬,中航工业制造所高起点引进自动铺带头核心部件,与自有数控技术及装配工艺集成的大型数控龙门铺带设备研制成功,利用自身的铺放工艺技术,目前设备已开始用于生产,但自动化应用程度不高,效率仍然较低。

国内大型复合材料结构多通道超声自动扫描成像检测设备已经研制成功,目前应用面不广,推广不力。



大型复合材料自动铺带机



电子束焊机

超精密、光学和精密加工设备从总体水平来看与国外相比尚有很大差距,已取得的突破大部分处于实验室阶段,只有少量应用于生产。

航空制造技术及装备 鼎立支撑航空工业发展

在几代人的艰苦努力下,我国航空工业发展取得长足的进步,逐渐由“望尘莫及”到“望其项背”,并且在某些方面可能“并驾齐驱”。随着我们的发展,高端制造工艺装备的缺乏现已成为制约航空工业发展的瓶颈,不解决好这个问题,会影响航空武器装备的转型升级,进而可能影响我国的国防安全。

“中航工业航空专用装备研发工程中心”于2011年5月5日获批成立,同年11月13日于北京航空制造

工程研究所正式揭牌。装备中心的成立意在解决那些航空厂所需求迫切而又难以进口的高端制造装备,突破西方国家的技术封锁,从点到面彻底摆脱航空工业中高端制造装备受制于人的局面。

与此同时探索高端航空专用装备开发的全新模式,联合多家装备生产单位,发挥专业化优势,在解决关键航空专用装备瓶颈的同时,利用灵活的市场机制实现自主运营,进而实现装备的使用单位和制造单位双赢的局面。因此,做好装备中心的工作,坚持走航空工艺装备自主化发展之路,对于航空专用装备发展至关重要。

目前,我国正处在工业转型的历史关口,由“制造大国”走向“制造强国”,前方面临着多重挑战。工艺装备尤其是高端工艺装备的技术突破

就是一个必须越过的门槛。高端装备的制造技术长期以来一直被美国、德国、日本等少数发达国家所垄断,在高端制造装备的生产和技术上一直对我国实行封锁。在欧美国家推行“再工业化”战略的背景下,这种封锁和制约只会愈演愈烈。

一些发达国家出于自身战略安全考虑,对可能用于军工生产的高端工艺装备采取严格的出口限制,对应用在航空武器装备上的工艺装备产品尤其重视,以期尽可能延缓我国军工产品升级换代步伐。因此,现在提坚持走航空工艺装备自主化发展之路,非常必要。

尤其是致力于研制工艺装备的单位,重点抓薄弱环节,突破关键技术和核心部件,明确研究方向和持续发展的目标。努力提高产学研用结合程度,提倡协同创新。通过突破创新主体间的壁垒,充分释放彼此间“人才、资本、信息、技术”等创新要素活力,鼓励社会资本投入,实现深度合作创新,避免以合同代开发的现象。对于使用工艺装备的单位,也要树立立足自主的思想,防止陷入“能力弱——依赖——越依赖能力越弱”的死循环。

随着近些年国家在高端装备制造领域投入的不断加大和企业对自主创新能力的培育,我们已经在一些高端装备制造领域有所突破,并且随着技术积累的不断加深和创新资源的逐渐成熟,我们的突破点会越来越多,全面突破西方国家的技术壁垒进而引领世界先进制造技术也不再是遥不可及。我相信我们有能力也有信心在制造装备自主化发展这条路上一直走下去。我更相信我们会为中国航空企业提供具有世界先进水平的技术和设备,使中国航空企业也能够像空客、波音公司一样生产出具有世界一流水平的飞机。

(责编 小城)