

面向高端装备制造业的高端制造装备需求趋势分析

张俊, 卢秉恒

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 西安 710049)

摘要: 高端制造装备是高端装备制造业快速发展的基础, 本文针对航空装备、航天装备、轨道交通装备、海洋工程装备、智能制造装备等高端装备制造业的“十三五”发展趋势, 分析了各领域对高端机床和高端基础制造装备提出的新需求和未来的发展重点, 并结合我国制造装备行业的现状, 提出了几点建议, 以促进我国高端装备制造业的良性发展。

关键词: 高端装备制造业; 高端制造装备; 机床; 基础制造装备

中图分类号: TH16 **文献标识码:** A

Requirement Analysis of High-End Manufacturing Equipment with a Focus on the High-End Equipment Manufacturing Industry

Zhang Jun, Lu Bingheng

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The continual development of high-end manufacturing equipment is essential for the development of the high-end equipment manufacturing industry. By examining the development trends of aeronautic equipment, aerospace equipment, rail transportation equipment, ocean engineering equipment and intelligent manufacturing equipment during the 13th Five-Year Plan, these authors analyze the new demands and future priorities of high-end manufacturing equipment. Starting from the current situation of manufacturing equipment enterprises in China, this paper puts forward suggestions to promote the sound development of the high-end equipment manufacturing industry.

Keywords: high-end equipment manufacturing industry; high-end manufacturing equipment; machine tool; basic manufacturing equipment

一、前言

高端装备制造业是国家“十二五”规划提出的战略性新兴产业七大领域之一, 是我国战略的基点, 是具有高技术含量和高附加值的装备制造产业, 属于高端制造业领域。发展高端装备制造业对带动我

国产业结构优化升级、提升制造业核心竞争力具有重要战略意义。按照《国务院关于加强培育和发展战略性新兴产业的决定》明确的重点领域和方向, 现阶段高端装备制造业发展的重点方向主要包括航空装备、卫星制造及应用、轨道交通装备、海洋工程装备、智能制造装备。

收稿日期: 2017-04-25; 修回日期: 2017-05-31

通讯作者: 卢秉恒, 西安交通大学, 教授, 中国工程院, 院士, 主要从事高端制造装备、增材制造装备方面的研究工作;

E-mail: bhlu@xjtu.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“高端装备制造及其对高端机床的需求”(2015-XY-37)

本刊网址: www.enginsci.cn

“工欲善其事，必先利其器”，高端装备的制造需要高端机床和铸、锻、焊等基础装备的支撑。我国正在实施的重大科技专项中，集成电路制造、大飞机、核电、惯性约束核聚变、对地观测、两机工程等专项均需要这些高端制造装备，它的充分发展是国防安全保障的重要基础。国外高端制造装备技术一般对外都会严格封锁，如果我们自己缺失这些，将严重制约我国的国防能力建设和战略产品的发展。近年来，欧美各国相继在高端制造领域出台了若干行动计划来促进装备制造业的发展。美国推出了“先进制造合作伙伴”（Advanced Manufacturing Partnership, AMP）计划；德国推出了“工业 4.0”项目；英国建立七大先进制造研究中心，并发布了高价值制造战略（High Value Manufacturing Strategy），欧盟启动了智能制造系统 2020 计划，我国于 2015 年开始实施“中国制造 2025”计划，这些计划中都部署了高端制造装备的相应内容。

高端制造装备是实现高端装备制造的基础，因此，高端装备能否国产化很大程度上取决于我国高端制造装备的技术水平。随着我国在航空、航天、轨道交通、海洋工程等领域的快速发展，这些领域的装备也逐渐向高、精、尖发展，对高端制造装备的需求也随之增大。本文针对我国高端装备制造业发展的四大主要方向，分析了“十三五”的发展趋势，对所需的高端制造装备进行了深入剖析，并提出了发展战略建议。

二、高端装备的发展和高端制造装备的需求分析

（一）航空装备

预计未来 10 年，航空工业生存发展的经济合理性将显著提高，关键技术研发强度持续增加，产业格局面临新的变化。干线飞机交付量将占国内市场份额 5% 以上，C919 客机的试飞开启了国产大飞机的时代，涡桨支线飞机交付量将约占全球市场份额的 20%，通用飞机和直升机交付量占全球市场份额将分别达到 20% 和 10%。航空发动机产业化发展，部分产品开始抢占国内飞机市场；实现机载设备与系统及配套产品年产值 500 亿元人民币；初步建立“系统、设备和器件”三个层次的航空设备与系统配套体系；建立长期、稳固、高质量和可信

赖的航空材料和元器件配套体系和完整的产业链。

随着航空产业多年来连续实施保障重点工程建设，航空制造已广泛采用数字化制造技术，初步实现在设计、制造、检测和装配过程中采用三维数模传递信息，以三维数模代替二维平面图纸作为制造和检验的依据。由于国产制造装备总体不足，航空制造企业主要是依赖采购进口制造装备，并在诸多方面受到了西方国家的限制。根据我国航空产业的发展趋势及航空产品的研制生产需要，制造装备的进一步提升已势在必行。航空领域关键制造装备要适应新一代航空产品研制中新材料、新结构、新工艺的发展，实现生产全过程的数字化、柔性集成化及智能化控制。航空产品从小批量向批量化生产快速转变，降低成本、提高产能等特点，对制造设备可靠性和精度稳定性以及装备的自动化、智能化与成套化提出了新的要求。

1. 飞机结构件加工装备

随着新一代飞机性能的不不断提高，航空整体结构件日趋复杂，其精度要求越来越高，钛合金、复合材料等先进结构材料的应用越来越多。目前我国研制的三坐标立式加工中心和龙门铣能满足强力加工需求，在高档数控机床与基础制造装备科技重大专项的资助下，陆续开发了五坐标大扭矩数控铣床、五坐标高速数控铣床等，实现了重要突破，但其可靠性、结构效率仍有待提升。发展能够满足现代飞机高强度、高精度的大型柔性结构件高效加工需求，适合钛合金零件铣削加工的高刚性的五轴设备，如五轴联动数控龙门式强力加工中心、五坐标卧式强力镗铣加工中心、五坐标立卧转换强力镗铣加工中心的产业化，仍需要继续努力。整体板框类铝合金零件加工的高速五坐标大型数控机床和蒙皮镜像铣设备仍在开发中。

我国基本上解决了飞机结构件装备的有无问题，但其可靠性、加工效率与国外先进装备仍有很大差距。近十年来，我国数控机床的无故障工作时间也从 400~500 h 提升到 1 000 h 以上，距离国外的 2000~3000 h 仍有较大差距。加工效率仅能达到国外先进水平的一半，主要是因为对多轴联动机床的动态特性、机电耦合特性分析不够，正向设计能力不足等，需要“产学研”密切深度合作才能解决。

2. 飞机发动机加工装备

飞机发动机叶片的型面五坐标数控铣加工设备

大多为与国外协作时从国外进口的,我国的大飞机专项,尤其是两机专项启动以来,西方国家对我国开始了新一轮的禁运,需要逐步发展加工稳定、效率高的五坐标叶片数控铣加工设备,并配有优化的叶片型面加工专用软件,方便快捷的UG编程后置处理软件,具有在线检测、叶片缺损修复等智能化功能。在叶片的精加工工序中,小曲率半径的进排气边需要机床具有高加速度的联动;还需要加工稳定且规格尺寸适宜的数控五轴联动磨床,以适应各种规格压气机叶片圆弧榫头和导向器叶片圆弧安装板成型加工。

对于机匣和盘轴等部件,五坐标精密镗铣中心、五坐标立式加工中心、五坐标车铣加工中心、精密数控万能外圆磨床缺一不可。现有的切削加工设备中,国产数控设备占25%,进口数控设备占75%。国产数控设备出厂时的精度基本能够满足一般精度等级的零件精加工工序要求,但精度下降得较快,没有进口设备的精度保持时间长。

发动机结构中,整体叶轮盘、涡轮盘等越来越多,对数控机床的五轴联动及高效加工能力提出了新挑战。增材制造为这一类加工提供了高效、低成本的新途径。增减材一体化的技术和装备将是未来重要的发展方向。

3. 复合材料成型与加工装备

随着军用机、民用机中的复合材料结构向大型化和整体化方向发展,传统的手工铺层方法已经不能满足大型整体构件的生产要求。国内尚无大型复合材料自动铺带设备,复合材料自动丝束铺放技术和设备一直受到发达国家对我国的技术封锁。复合材料自动丝束铺放设备要具备预浸丝束的送进、定位、加热、滚压、裁断等功能。此外,还需进一步研制直径在5 m以上、长度在15 m以上的大型热压罐,满足复合材料大型整体结构的研制生产需求。

飞机结构中复合材料用量逐渐上升,与金属材料的切削加工不同,复合材料加工要求分层劈裂小、纤维切断能力强、表面质量好。目前国内复合材料结构件的加工设备主要依靠进口,适合大型复合材料薄壁件外缘加工和钻孔设备,以及柔性夹具系统需求缺口较大。

(二) 航天装备

据粗略估计,至2020年我国需要发射的卫星

将超过200颗。按照卫星质量分类,1 t以下的卫星约占45%,1~4 t的卫星约占30%,5 t以上的卫星约占25%。在近地轨道卫星中,超过5 t的有效载荷基本都为载人航天工程用的货运飞船、空间站等;太阳同步轨道卫星中,1~4 t重的卫星所占比例超过了50%;地球同步转移轨道、地球同步轨道卫星中,1~4 t和5 t以上所占比例基本相当,但是随着我国未来新卫星平台的研制,地球同步轨道卫星质量加大将是必然趋势。从上述需求来看,有效载荷对中型运载火箭的需求比较旺盛,近地轨道的有效载荷采用正在研制的长征-7基本上可以满足发射需求,而太阳同步轨道1~4 t的卫星及地球同步轨道5 t以上的卫星,现有的中型运载火箭的运载能力还未能完全覆盖上述需求,是中型运载火箭型谱化论证需要发展的重点领域[1]。

航天装备的发展趋势表现在以下几个方面:①朝大型化、重型化方向发展,为适应一星多用、卫星功能多样化、长寿命运行的发展要求,卫星载荷、卫星在轨维持、机动所需携带的燃料都越来越多,因而需要具有制造大型、重型运载火箭的能力;②向超高精度发展,航天装备结构形状与零部件配合关系复杂,其尺寸精度、表面质量以及装配精度要求很高,对航天制造技术的加工精度提出了较高要求;③另一方面朝微小型方向发展,微小型航天器已成为国际宇航界的发展趋势,高性能的微小型航天器设计与制造对航天高端制造领域提出了新的要求和挑战。

1. 光学遥感器制造技术与装备

光学遥感器是卫星实现对地及空间物体观测的核心载荷,我国空间遥感器制造瞄准国际先进制造技术,硬件设备和基础技术取得了长足进步,在加工精度和效率方面有了很大改进,但与空间光学遥感器未来的技术发展趋势、国家型号任务需求相比还有一定差距。研制大口径等离子体抛光设备、超大口径超精密铣磨机、超大口径智能机械手研抛机等高端设备,实现大口径、超大口径光学零件的高效高精度加工是未来发展方向。

2. 弹箭及运载器制造装备

运载火箭要实现高性能、高可靠性和低成本的目标,在强度、刚度、质量稳定性等方面具有新的需求,同时对工艺过程控制的可靠性和稳定性提出了更高的要求,因此对运载火箭的生产提出了“快

速、高效、高可靠、数字化、柔性化、自动化装配”的应用需求。尤其是重型运载火箭发动机钛合金喷管大型热成形专用设备,钛合金真空超塑成形/扩散连接设备及热成形生产线装备,3.35~10 m 系列直径箭体结构高效加工及精密焊接装备,高精度大型超高强度钢变壁厚封头、圆筒数控强力旋压装备,高精度大型超高强度钢壳体高效化激光电弧复合焊接与自动化装配装备,大型吊挂式发动机厚壁鞍形焊缝高精度激光电弧复合焊接与自动化装配装备。在切削加工方面,需要大型固体助推器分段金属壳体数控双主轴卧式车铣复合加工装备,直径大型固体助推器复杂结构连接环壳体与扩张段壳体立式车铣复合加工装备,直径大型薄壁复杂结构铝裙高效化立式车铣复合加工装备。大型筒体的焊接还需要大型精密的工装夹具及在线加工的大型装备,开发难度大、费用高。增材制造装备及增减材一体化装备可以是一个创新工艺及技术捷径,且可以避免加工过程中变形,应该大力发展。

3. 航天复合材料制造装备

与航空装备中的复合材料需求类似,航天装备中的复合材料构件需要复杂形面、高精度复合材料缠绕机、大尺寸复合材料铺丝机,以及高效、高速、高精度数控复合材料切削机床等。

4. 航天复杂结构精密/超精密制造装备

航天惯性器件、位标器光学组件、伺服阀和星敏感器中有许多尺寸精度和形状精度高、结构复杂、易变形、材料难加工的零件,因此亟需突破航天精密/超精密制造瓶颈,形成具有特色的航天精密/超精密制造检测设备研发能力,铣磨类设备力争达到加工形状精度为 0.5 μm 、表面粗糙度为 80 nm,车削类设备力争达到加工形状精度为 0.1 μm 、表面粗糙度为 4 nm。

(三) 轨道交通装备

2015 年,我国轨道交通装备产业产值规模超过 4 000 亿元,居世界首位。我国已建成一批具有国际先进水平的轨道交通装备制造基地,全国具备年生产大功率机车 2 000 台,动车组、铁路客车、城轨车辆 8 000 辆,各型货车 60 000 辆,大型养路机械 500 台/套,以及年大修机车 2 000 台、动车组及各类轨道客车 5 000 辆、各型货车 70 000 辆的生产和服务能力。“十三五”期间,国内轨道交通装

备需求旺盛,仍将保持高位增长态势。轨道交通车辆及附属设备领域的配套产品越来越多,主机与市场份额逐年增长;用户需求日益个性化和多样化,劳动力成本不断攀升,产品价格却不断下降。产品配置多样化、设计复杂性增加、交货期缩短,使制造系统的全价值链都在提速,采用较低的成本生产出满足用户个性化需求的产品。轨道交通装备制造产业将向智能化、自动化、信息化、集成化、高速化、绿色化方向发展。

1. 板料成型装备

板料成型装备包括面向机车及城轨产品各种零件折弯的大功率数控成型机,数控压力成型机,数控拉弯机,板材切割的激光和等离子切割机,曲面零件成型的大功率油压机,薄板零件冲孔的数控步冲机。

2. 车体加工装备

需要面向大型车体加工的高速龙门加工中心,大型立卧加工中心,数控镗铣床组成的高柔性生产线。面向车轮、车轴等加工的双刀塔立式数控车削中心,多轴联动车铣复合中心,高精度磨削中心。

3. 小型基础零件加工装备

齿轮传动系统和锻钢制动盘对加工装备的需求较高。普通滚齿机生产效率低,加工精度差,难以满足批量生产要求,对产品正确啮合及使用寿命有影响。国外普遍采用六轴四联动数控滚齿机加工,国内生产厂家生产的六轴四联动的数控滚齿机,尚不能保证机车车辆产品精度要求。在磨齿机方面,需求工件模数小于等于 40 mm,齿宽大于等于 580 mm、精度 3~4 级的磨齿机。带散热筋锻钢制动盘是高速动车组基础制动系统中的关键零部件之一,其特点是盘体直径大、散热筋高、厚度小,属于大型薄盘类锻件,锻件材质为 30CrNiMoA,锻件重量约为 100 kg。由于散热筋多达 24 条且均匀地分布于盘面上,不易于机械加工,需要在模锻时予以锻出。

4. 板材自动焊接

在大型板材的焊接工艺上,需要激光(等离子)-电弧复合焊接装备、搅拌摩擦焊接装备、面向焊缝精整的自动抛光及打磨机和各类自动化焊接设备。建立中厚板金属材料激光复合焊接工艺数据库,实现轨道交通车辆大部件激光复合焊接工程化应用和厚板(车钩板及枕梁等)搅拌摩擦焊新工艺应用。

（四）海洋工程装备

随着国际海洋油气装备开发领域的蓬勃发展，南海等深水油气探区的勘探开发已成为我国中长期能源发展规划的重点。近年来，我国在海洋工程装备研发制造领域取得显著进步，大型浮式液化天然气生产系统、大型浮式钻井生产储卸油系统、大型半潜式钻井和生产平台等新概念装备不断涌现，关键技术取得重要突破。大吨位的抱柱式起重机、超大型低压拖缆机等海洋工程配套设备已开始研发与建造。大力发展海底矿藏开发装备，建立和完善多种深海资源的开发与加工技术系列和装备，优先完成具有商业前景矿种商业开采前的系统设计加工和深海试验研究、建设国际一流的开放型综合试验基地。

面向性能要求不断提高的海洋工程装备，结合超大复杂曲面多、部分制造环境狭小恶劣、关键设备设施精度要求极高等难题，相应制造装备的高精度、高质量、高效率、低成本等显得越来越重要。

1. 高精度平台板材加工设备

海洋平台上安装有大量质量重、体积大、作业要求高的大型配套设备，对安装基础提出了很高的要求。1 000 吨级的平台吊机需要直径 10 m 的高精度圆形底座，钻井月池的导轨长达 60 m，精度要求达到 0.5 mm，需要可以在平台狭小区域内对大型和超大型平面进行高精度加工的机床设备。海洋平台多位单件产品，分段大小不一，板厚差异巨大，板材基本单件切割，因此要求加工机床的适应性广，易于对不同的形状、厚度、材质的钢板进行准确的加工。

2. 螺旋桨复杂曲面加工设备

大型螺旋桨制造工艺流程中端面及轴孔加工、桨叶面加工是螺旋桨生产的关键步骤，在加工过程中大量使用数控机床，包括用于大桨毂直径和深度加工的高端高精度立式车床，跨径超过 11 m 的多轴联动数控铣床以满足更大尺寸的螺旋桨，螺旋桨叶面以及导边和随边型面的全自动数控打磨机床，提升螺旋桨制造能力的高端铣磨复合机床。

3. 深孔加工设备

船舶的尾轴孔、舵轴孔等均为深孔结构，且运行时承载载荷大，需要加工时保证同心度和平整度。较大的加工误差将给尾轴安装和船舶营运安全和效率造成极大影响。这种深孔结构往往直径达到

700~1 200 mm，深度超过 2 000 mm，且为在室外现场加工。现有加工镗床由于受到本身结构挠度、加工时的环境温度的影响，确保加工精度难度很大，需要研制一款适应室外加工环境的深孔镗床，具备在机精度测量功能和误差补偿功能，克服导杆变形、刀具磨损以及温度变化对加工精度的影响。此外，中速柴油机有大量复杂的贯穿油路，最大深径比超过 30，孔壁粗糙度 (Ra) 不能大于 1.6，需要采用高精度的深孔钻削装备进行加工。

4. 船用主机加工设备

船用低速柴油机的机体由气缸体、机架和机座三部分组成，中速柴油机的机体则为独立的零件。上述机体零件加工需要工作台 4 m×12 m 以上的数控龙门镗铣床、主轴直径 200 mm 及以上、X 轴行程 10 m 及以上的数控卧式镗铣床、数控钻床（以主轴直径 200 mm 及以上、X 轴行程 10 m 及以上为主）等。柴油机连杆和活塞杆的加工设备主要包括：数控龙门镗铣床、数控卧式镗铣加工中心、数控卧式大车、深孔钻机和精密磨床。

5. 现场修复的 3D 打印装备

海洋装备工作时通常远离制造企业所在地，当其零部件损毁或磨损失效后，供应补给异常困难，而 3D 打印装备可以现场修复，需要根据易损件的成组分类及其安放空间，发展适用的 3D 打印装备。

（五）智能制造装备

上述高端制造装备技术不断与时俱进地向前发展，传感器和智能工艺控制软件需要大力发展，从而成倍提升制造装备的效率，保持加工质量的稳定。另外制造大数据可以通过加工实例的分析和自主学习，优化工艺和制造装备的设计，因此需建设制造大数据平台，开展机器自动学习和虚拟现实等技术。使装备进入智能制造，进一步提高制造装备和生产系统的效率。

三、高端制造装备的发展建议

历史经验告诉我们，强大的制造能力是高端装备水平和能力的根本，也是国际话语权的主导因素，是当前我国发展“一带一路”等战略的保障。如果西方国家对我国进行高端制造装备的封锁，那么将严重制约我国大飞机、卫星、高速铁路及海洋装备

的快速发展。高档数控机床与基础制造装备国家科技重大专项实施八年来,突破了高档数控系统的瓶颈,填补了部分高档机床的空白,开始进入航空航天制造领域,但由于性能尚需在大量应用中改进提升,加上一些体制性约束,国产装备广泛应用还有障碍。为快速提升我国军工制造能力,保障国防工业信息安全,提出以下建议。

(1) 开展换脑工程,研发自主软件。进口数控系统受监控,存在信息“后门”,应用于军工产品和装备的软件同样存在此问题。需要开展换脑工程及自主软件(如 CAD、CAE 等软件)的开发。基础软件开发需要多年的技术积累,但可以基于通用软件开发专用软件,使我国的产品设计与进口软件绝缘,保证信息安全。

(2) 积极推行军工全民采购。军工采购采取安全一票否决制,支持采购国产装备,支持自己的装备制造企业,使我国的国防安全铜墙铁壁。

(3) 打破体制约束,鼓励机床企业以加工服务

方式,进入航空航天及军工领域的加工制造,以迅速壮大航空航天等生产能力。同时,也给机床行业提供发展机会。解决航空航天制造能力亟待迅速提升及机床行业准入发展的难题,取得共赢持久发展。

(4) 继续支持高档数控机床与基础制造装备科技重大专项。支持其成果走向产业化,使其能满足航空航天迅速发展的新需求,并向智能制造提升。使我国数控装备水平迈向国际前列,促进“中国制造 2025”的顺利实施。

(5) 尽快启动智能制造国家重大科技工程。使“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项的发展不间断地延续到智能制造方面来,以免贻误时机。

参考文献

- [1] 杨邦会, 池天河. 对我国卫星遥感应用产业发展的思考 [J]. 高科技与产业化, 2010, 6(12): 26-29.
Yang B H, Chi T H. Thinking for the development of satellite remote sensing application industry [J]. High-Technology & Industrialization, 2010, 6(12): 26-29.