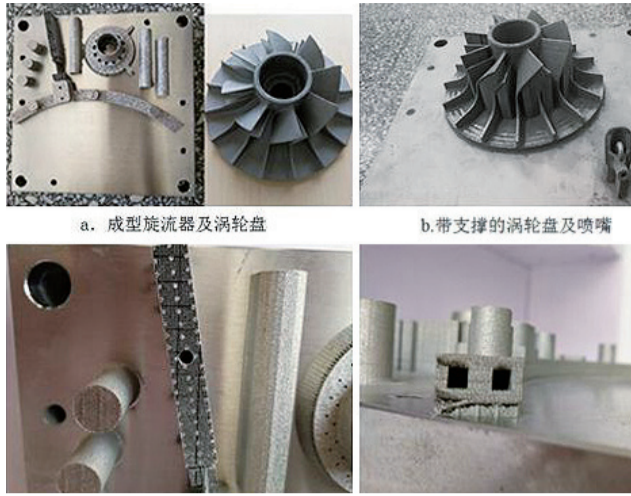


高温合金预旋流喷嘴激光增材制造技术研究获进展



喷嘴具有结构精密、技术要求高、制造工艺复杂等特点，其典型特征包括微孔、微槽、微锥等。喷嘴关键零件（如副喷嘴、旋流芯、柱塞等）的尺寸结构一致性、尺寸配合精度等特性都对民用发动机燃烧室的工作性能、燃烧效率及可靠性有直接且重大的影响。

目前我国在制造一致性、加工效率、测量精度、测试方法和生产成本控制等方面与国外存在较大的差距，尚无法突破喷嘴全研制流程中从工作机理研究到关键件的确定性制造与精密检测、再到局部或整体性能的精密测试与准确分析等各环节的瓶颈。既有基于增材制造的激光选区熔化技术快速研制的需要，中国科学院工程热物理研究所的新技术实验室拟发展的技术体系将喷嘴优化设计、增材制造、后处理与检测融为一体，开展基于增材制造技术的一体化轻量化拓扑优化设计、激光选区熔化工艺设计与成形、增材制造后处理与检测等技术研究，掌握基于增材制造的结构优化设计方法，建立高温合金激光选区熔化工艺数据库，完成激光选区熔化共性技术研究。

面向增材制造工艺的预旋流喷嘴优化设计技术

在对喷嘴的性能、功能等要求的

充分调研基础上，新技术实验室从工艺、效率、成本及服役环境等多角度出发，明确其受载状态，对喷嘴壳体原有的5个部件进行整体设计，并对一体化后的零件做了多种拓扑优化方案，选取满足理论计算性能要求的3种优化结果。

高性能金属构件激光选区熔化增材制造技术

开展航空发动机预旋流喷嘴激光选区熔化增材制造工艺设计，包含工艺路线规划、工艺参数影响分析、工艺控制形位设计、工艺支撑结构设计，并进行喷嘴零件的成形制造，验证优化设计结构的可加工性。

零件成形—工艺验证

为验证工艺支撑及烧结参数，新技术实验室分别成形了涡轮盘、旋流器、小燃机喷嘴等零件，并通过总结成形过程中的工艺问题，对支撑及烧结参数进行不断更改，形成了4种组合支撑结构。

该项目为所内其他设计部门提供了各种难加工件的优化设计及制造服务，提升了研究所制造和工艺方面的能力。（边辰）

基于双球法的燃油喷嘴内腔锥角精密测量系统

航空工业精密所 毕超

在航空发动机中，燃油喷嘴组件（以下简称“喷嘴”）是各个燃油系统的末端部件，主要用于将燃油雾化以加速混合气的形成，并根据发动机的不同工作状态为燃烧室提供合适数量的、具有良好雾化质量的油雾，从而确保燃烧的稳定性和高效性。作为燃烧室的核心零件之一，喷嘴具有尺寸较小、结构精密、技术要求高和制造工艺复杂等特点，并且其尺寸精度和一致性对于发动机燃烧室的燃油分布、燃烧效率和工作稳定性等均具有很大影响。

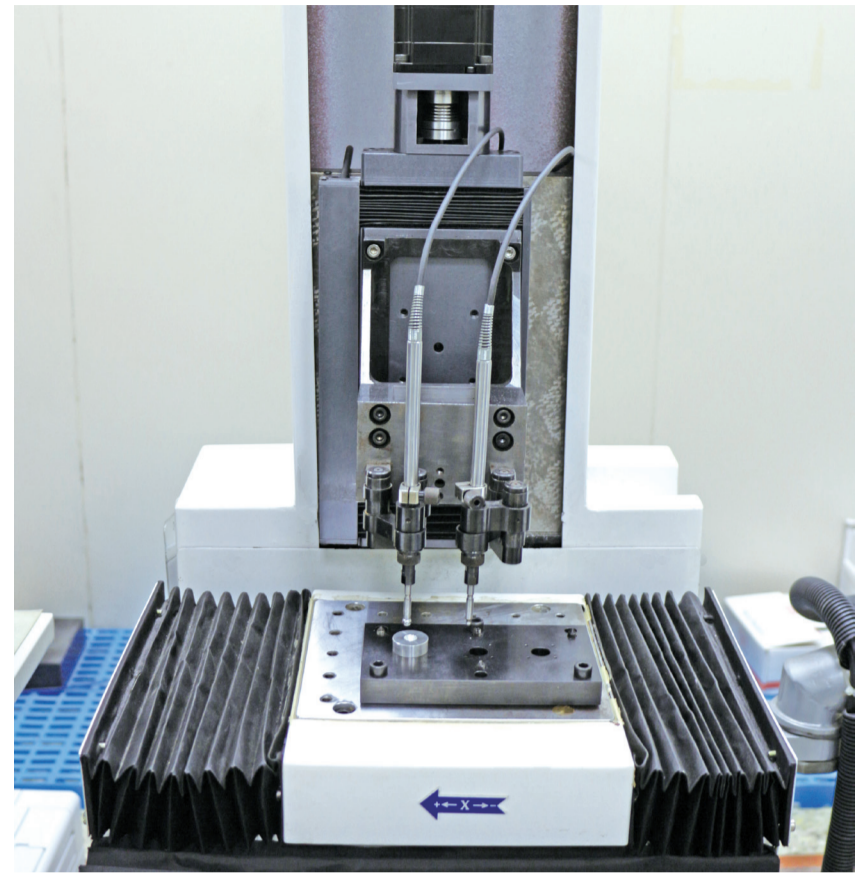
一般说来，喷嘴是一类复杂而精密的小型零件，材料多为高温合金，其典型的结构特征包括内锥、中心孔和螺旋槽等。其中，内锥是喷嘴内腔中靠近中心孔的一段区域，长度较短，并且呈现为渐缩状的形态特征，因而其锥角又称为渐缩角。该参数对于喷嘴的流量特性、雾滴尺寸和雾化锥角等都有很大影响。因此，开展喷嘴内腔锥角的精密、高效和自动化测量技术研究，已经成为提升燃烧室整体性能的关键环节。目前，关于锥角的概念及测量原理已有明确的定义与解释，但在绝大多数情况下，仍然采用传统手段和方法进行手工测量。例如，对于常规机械零件上的锥角特征的测量和检定，通常采用正弦规和一些辅助量具进行。虽然能够解决某些通用或特定零件的锥角特征检测难题，但均无法实现燃油喷嘴等小型精密零件上的内腔锥角的精确、快速和定量检测，能应用于生产现场并快速准确直观地检测喷嘴锥角的设备尚处于空白状态，这就导致在国内的生产现场只能通过定性判断或修配测试来筛选出合格的喷嘴零件，不仅降低了喷嘴结构尺寸检测的一致性，而且对喷嘴的流量和雾化特性产生了不利影响。

在这样的背景下，航空工业精密所依托自身在精密、超精密制造技术以及精密测量、测试技术等领域的丰

富经验和技能积累，在航空发动机燃油喷嘴组件的精密测试技术方面开展了卓有成效的研究，研制出了基于双球法的燃油喷嘴内腔锥角精密测量系统，可以实现内腔锥角的自动化测量，具有较高的性价比，从而为当前我国航空发动机制造过程中存在的喷嘴等复杂零件的测量效率低和精度差等问题提供了一项技术解决方案。

该测量系统的机械本体采用了紧凑的立柱式结构，主要由底座和运动机构等部分组成。其中，底座采用了00级的天然花岗岩平台，其表面经过网格法检验后的平整度达到了 $3.5\mu\text{m}$ ，以用于整个系统的支撑与安装；运动机构由X、Y和Z三个直线运动轴构成，以用于实现预定的测量轨迹。在控制系统方面，该测量系统采用了主流工控机（上位机）与专用多轴运动控制器（下位机）相结合的二级位置闭环数字复合控制结构，这种多计算机的控制方式既满足了系统的快速性和实时性要求，也增强了配置和操作的灵活性。上位机与下位机组成主从式控制方式，并采用以太网进行通讯。上位机主要负责各轴状态的实时监控、控制命令的发布以及各种信号的反馈和调整等工作，同时也提供图形化的人机界面，以供操作者进行灵活的测量操作，并负责数据导入、数据收集、结果计算和显示等工作；下位机的核心采用PMAC多轴运动控制卡，主要负责接收上位机的运动指令并进行插补运算，以实现伺服运动控制，如电机运行状态的闭环调节、各轴驱动器的实时反馈、运动轨迹路线的规划和计算、回零和限位信号的处理等工作；同时，下位机还具有误差补偿功能，能够对测量系统的直线度误差、垂直度误差等进行补偿，经过补偿的三轴运动平台的综合精度可以达到 $5\mu\text{m}$ 。

在锥角的测量与计算中，对被测圆锥体的轴线、垂线和端面等几何特征与锥孔测头的相互位置关系要求十分严格，否则就会产生较大的测量误



差。因此，在测量过程中，锥孔测头要对准喷嘴的轴线，才能使测头端部顺利伸入喷嘴内腔中与内锥面完全接触。为了避免测头轴线与喷嘴轴线之间的偏差所带来的测量误差，基于“浮动入孔”技术设计了具有自适应入孔功能的双球锥孔测头，主要由直线位移传感器、浮动夹头、精密滑动轴承、球杆和钢球等构成。其中，浮动夹头能够在XY平面内提供微小的浮动量，浮动范围为 $0\sim 1.5\text{mm}$ 并且连续可调。通过采用浮动夹头可以使测头端部的钢球在XY平面内进行小范围活动，当其进入圆锥孔而接触到内锥面时，可以自动找到正确的轴线，以使测头轴线与喷嘴轴线重合，从而提高了测量精度，并且避免了测头端部的钢球的磨损。

在测量过程中，首先将被测喷嘴零件固定在测量系统工作台面上的夹具中，以使被测喷嘴的几何轴线与测量系统的Z轴之间的平行度误差处于允许范围内。然后，运行上位机软件控制各个直线轴的运动以完成测量数据的采集和保存，最后将测量数据代入公式即可计算得到被测喷嘴零件的内腔锥角 α 。

由航空工业精密所研制的基于双球法的燃油喷嘴内腔锥角精密测量系统，突破了浮动入孔、多轴运动控制、双球锥孔测头标定、数据高效处理以及系统误差补偿等关键技术，可以实现航空发动机燃油喷嘴组件的内腔锥角的高效精密测量，从而为喷嘴等小型复杂零件提供一项尺寸检测的技术解决方案。

智能工厂建设的主要模式及国内外发展现状

智能工厂是实现智能制造的重要载体，主要通过构建智能化生产系统、网络化分布生产设施，实现生产过程的智能化。智能工厂已经具有了自主能力，可采集、分析、判断、规划；通过整体可视技术进行推理预测，利用仿真及多媒体技术，将实境扩展示设计与制造过程。系统中各组成部分可自行组成最佳系统结构，具备协调、重组及扩充特性，已系统具备了自我学习、自行维护能力。因此，智能工厂实现了人与机器的相互协调合作，其本质是人机交互。

智能工厂主要建设模式

由于各个行业生产流程不同，加上各个行业智能化情况不同，智能工厂有以下几种不同的建设模式。

第一种模式是从生产过程数字化到智能工厂。在石化、钢铁、冶金、建材、纺织、造纸、医药、食品等流程制造领域，企业发展智能制造的内生动力在于产品品质可控，侧重在生产数字化建设起步，基于品控需求从产品末端控制向全流程控制转变。因此其智能工厂建设模式为：一是推进生产过程数字化，在生产制造、过程管理等单个环节信息化系统建设的基础上，构建覆盖全流程的动态透明可追溯体系，基于统一的可视化平台实现产品生产全流程数据的整合和共享；二是推进生产管理一体化，搭建企业CPS系统，深化生产制造与运营管理、采购销售等核心业务系统集成，促进企业内部资源和信息的整合和共享；三是推进供应链协同化，基于原材料采购和配送需求，将CPS系统拓展至供应商和物流企业，横向集成供应商和物流配送协同资源和网络，实现外部原材料供应和内部生产配送的系统化、流程化，提高工厂内外供应链运行效率；四是整体打造大数据化智能工厂，推进端到端集成，开展个性化定制业务。

第二种模式是从智能制造生产单元（装备和产品）到智能工厂。在机械、汽车、航空、船舶、轻工、家用电器和电子信息等离散制造领域，企业发展智能制造的核心目的是拓展产品价值空间，侧重从单台设备自动化和产品智能化入手，基于生产效率和产品效能的提升实现价值增长。因此其智能工厂建设模式为：一是推进生产设备（生产线）智能化，通过引进符合生产所需的智能装备，建立基于CPS系统的车间级智能生产单元，提高精准制造、敏捷制造能力。二是

拓展基于产品智能化的增值服务，利用产品的智能装置实现与CPS系统的互联互通，支持产品的远程故障诊断和实时诊断等服务；三是推进车间级与企业级系统集成，实现生产和经营的无缝集成和上下游企业间的信息共享，开展基于横向价值网络的协同创新。四是推进生产与服务的集成，基于智能工厂实现服务化转型，提高产业效率和核心竞争力。

例如，广州数控通过利用工业以太网将单元级的传感器、工业机器人、数控机床，以及各类机械装备与车间级的柔性生产线总控制台相连，利用以太网将总控制台与企业管线的各类服务器相连，再通过互联网将企业管系统与管理上下游企业相连，打



通了产品全生命周期各环节的数据通道，实现了生产过程的远程数据采集分析和故障监测诊断。三一重工的18号厂房是总装车间，有混凝土机械、路面机械、港口机械等多条装配线，通过在生产车间建立“部件工作中心岛”，即单元化生产，将每一类部件从生产到下线所有工艺集中在一个区域内，犹如在一个独立的“岛屿”内完成全部生产。这种组织方式，打破了传统流程化生产线呈直线布置的弊端，在保证结构件制造工艺不改变、生产人员不增加的情况下，实现了减少占地面积、提高生产效率、降低运行成本的目的。目前，三一重工已建成车间智能监控网络和刀具管理系统、公共制造资源定位与物料跟踪管理系统、计划、物流、质量管控系统、生产控制中心（PCC）中央控制系统等智能系统，还与其他单位共同研发了智能上下料机械手、基于DNC系统



的车间设备智能监控网络、智能化立体仓库与AGV运输软硬件系统、基于RFID设备及无线传感网络的物料和资源跟踪定位系统、高级计划排程系统（APS）、制造执行系统（MES）、物流执行系统（LES）、在线质量检测系统（SPC）、生产控制中心管理决策系统等关键核心智能装置，实现了对制造资源跟踪、生产过程监控，计划、物流、质量集成管控下的均衡化混流生产。

第三种模式是从个性化定制到互联工厂。在家电、服装、家居等距离用户最近的消费品制造领域，企业发展智能制造的重点在于充分满足消费者多元化需求的同时实现规模经济生产，侧重通过互联网平台开展大规模个性化定制模式创新。因此其智能工厂建设模式为：一是推进个性化定制生产，引入柔性化生产线，搭建互联网平台，促进企业与用户深度交互、广

泛征集需求，基于需求数据模型开展精益生产；二是推进设计虚拟化，依托互联网逆向整合设计环节，打通设计、生产、服务数据链，采用虚拟仿真技术优化生产工艺；三是推进制造网络协同化，变革传统垂直组织模式，以扁平化、虚拟化新型制造平台为纽带集聚产业链上下游资源，发展远程定制、异地设计、当地生产的网络协同制造新模式。

国内外智能工厂建设的现状

近年来，全球各主要经济体都在大力推进制造业的复兴。在“工业4.0”、工业互联网、物联网、云计算等热潮下，全球众多优秀制造企业都开展了智能工厂建设实践。

例如，西门子安贝格电子工厂实现了多品种工控机的混线生产；FANUC公司实现了机器人和伺服电机生产过程的自动化和智能化，并利用自动化立体仓库在车间内的各个智能制造单元之间传递物料，实现了最高720

小时无人值守；施耐德电气实现了电气开关制造和包装过程的全自动化；美国哈雷戴维森公司广泛利用以加工中心和机器人构成的智能制造单元，实现大批量定制；三菱电机名古屋制作所采用人机结合的新型机器人装配产线，实现从自动化到智能化的转变，显著提高了单位生产面积的产量；全球重卡巨头MAN公司搭建了完备的厂内物流体系，利用AGV装载进行装配的部件和整车，便于灵活调整装配线，并建立了物料超市，取得明显成效。

当前，我国制造企业面临着巨大的转型压力。一方面，劳动力成本迅速攀升、产能过剩、竞争激烈、客户个性化需求日益增长等因素，迫使制造企业从低成本竞争策略转向建立差异化竞争优势。在工厂层面，制造企业面临着招工难，以及缺乏专业技师的巨大压力，必须实现减员增效，迫切需要推进智能工厂建设。另一方面，物联网、协作机器人、增材制造、预测性维护、机器视觉等新兴技术迅速兴起，为制造企业推进智能工厂建设提供了良好的技术支撑。再加上国家和地方政府的大力支持，使各行业越来越多的大中型企业开启了智能工厂建设的征程。

我国汽车、家电、轨道交通、食品饮料、制药、装备制造、家居等行业的企业对生产和装配线进行自动化、智能化改造，以及建立全新的智能工厂的需求十分旺盛，涌现出海尔、美的、东莞劲胜、尚品宅配等智能工厂建设的样板。

例如，海尔佛山滚筒洗衣机工厂可以实现按订单配置、生产和装配，采用高柔性的自动无人生产线，广泛应用精密装配机器人，采用MES系统全程订单执行管理系统，通过RFID进行全程追溯，实现了人机互联、物

互联和人机互联；尚品宅配实现了从款式设计到构造尺寸的全方位个性化定制，建立了高度智能化的生产加工控制系统，能够满足消费者个性化定制所产生的特殊尺寸与构造板材的切削加工需求；东莞劲胜全面采用国产加工中心、国产数控系统和国产工业软件，实现了设备数据的自动采集和车间联网，建立了工厂的数字映射模型（Digital Twin），构建了手机壳加工的智能工厂。

但是，我国制造企业在推进智能工厂建设方面，还存在诸多问题与误区：

盲目购买自动化设备和自动化生产线。很多制造企业仍然认为推进智能工厂就是自动化和机器人化，盲目追求“黑灯工厂”，推进单工位的机器人改造，推行机器换人，上马只能加工或装配单一产品的刚性自动化生产线。只注重购买高端数控设备，但却没有配备相应的软件系统。

尚未实现设备数据的自动采集和车间联网。企业在购买设备时没有要求开放数据接口，大部分设备还不能自动采集数据，没有实现车间联网。目前，各大自动化厂商都有自己的工业总线通信协议，OPC UA标准的应用还不普及。

工厂运营层还是黑箱。在工厂运营方面还缺乏信息系统支撑，车间仍然是一个黑箱，生产过程还难以实现全程追溯，与生产管理息息相关的制造BOM数据、工时数据也不准确。设备绩效不高。生产设备没有得到充分利用，设备的健康状态未进行有效管理，常常由于设备故障造成非计划性停机，影响生产。

依然存在大量信息孤岛和自动化孤岛。智能工厂建设涉及到智能装备、自动化控制、传感器、工业软件等领域的供应商，集成难度很大。很多企业不仅存在诸多信息孤岛，也存在很多自动化孤岛，自动化生产线没有进行统一规划，生产线之间还需要中转库原因，是智能制造和智能工厂涵盖领域很多，系统极其复杂，企业还缺乏深刻理解。在这种状况下，制造企业不能贸然推进，搞“大跃进”，以免造成企业的投资打水漂。应当依托有实战经验的咨询服务机构，结合企业内部的IT、自动化和精益团队，高层积极参与，根据企业的产品和生产工艺，做好需求分析和整体规划，在此基础上稳妥推进，才能取得实效。（李想）

