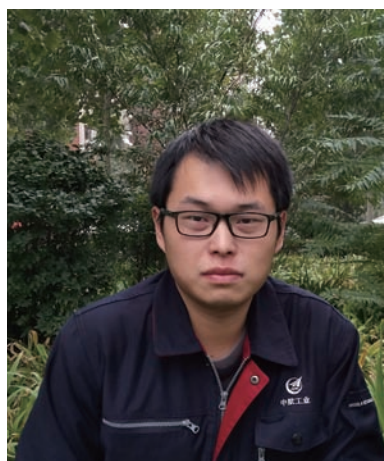


# 航空发动机制造技术发展展望

■ 惠阳航空螺旋桨有限责任公司（河北保定 071051） 李添宇

**摘要：**阐述树脂基复合材料性能，评述国内外复合材料工艺制备技术与应用，详细总结了制造质量、产学研结合、MBD制造、知识库及技术路线的研究途径，分析、展望了航空制造技术的发展方向。



为了进一步提高大涵道比涡扇发动机的研制水平，满足发动机低油耗设计要求，提高发动机的市场竞争力，对航空发动机制造技术提出了更高、更迫切的要求，其中减重已成为各大发动机生产商的主要目标之一。

由于复合材料在比强度和比刚度方面的优势，采用复合材料代替传统的金属材料，是提高发动机推重比、减轻发动机质量行之有效的方法和手段。某发动机复合材料叶片如图1所示。

传统的航空发动机材料虽然仍有进一步发展的余地，但其发展潜力已经有限，很难满足未来军民航空发动机更加苛刻的温

度和质量要求。随着航空发动机性能的不断提高，特别是质量的不断减轻，在依靠整体性新颖结构的同时，还将越来越多地依赖于高比强度、低密度、高刚度和耐高温能力强的先进材料。

## 1. 国外复合材料制造技术

复合材料由于其质量轻、性能可靠等特点，已成为航空发动机和其他机种的动力装置优先选用的材料。早在20世纪就已开始尝试在发动机中采用复合材料并在大型燃气涡轮发动机等方面应用，都在用质量轻的高性能复合材料取代金属制造发动机零部件，如美国两大龙头航空发动机制造企业普拉特·惠特尼公司的PW4000型大型涡轮风扇喷气发动机机舱系统的许多部件、推力反向器、风扇罩、风扇出风道导流片等都是用复合材料制造的，能产生7万lb（1lb=0.453 59kg）



图1 某发动机复合材料叶片

拉力，其中许多用复合材料制造的部件质量比采用金属轻30%；罗尔公司生产的发动机进气口罩的外壳是由美国聚合物公司的碳纤维环氧树脂预浸料（E707A）叠铺而成；法国斯奈克玛公司的M88发动机外涵机匣、喷管鱼鳞片均采用树脂基复合材料制造。目前，国外树脂基复合材料还在发动机的静子叶片、转子叶片、包容机匣以及发动机短舱、反推力装置等部件上得到大量应用，采用先进的复合材料零部件能大大改善航空发动机作为整机核心结构的机械物理性能、工艺结构性、可加工性和可实现性。

## 2. 国内复合材料制造技术

复合材料研制在我国尚处于初期阶段，复合材料强度、刚度校核模拟仿真，成形工艺等关键技术研究刚刚起步，要实现复合材料在发动机上的应用，特别是在大涵道比涡扇发动机上的应用，还需开展大量的基础和应用研究工作。

经过多年的研究和发展，树脂基复合材料现已成为航空发动机的候选材料，国内正在大力

开展航空发动机复合材料制造、试验、无损检测及建标等工作，从而积淀复合材料加工技术，提高复合材料加工精度，进而实现高性能航空发动机的精密高效加工。

树脂基复合材料耐高温能力较低，但其密度较低，比强度和比模量高、耐疲劳与耐腐蚀性好、阻噪能力强，可以在航空发动机静子叶片等部件上应用，可明显降低发动机叶片质量，降低其全寿命成本，有效提高航空发动机性能。

### 3. 制造质量

航空发动机的高温、高压、高速旋转，变工况，空间狭小和应力高等工作特点，决定了其零部件制造技术的复杂性，而复合材料用量多少和应用部位，标志着发动机的先进程度，也是衡量一个国家航空发动机设计和制造水平的重要指标。航空发动机制造质量的提高可有效提高其市场竞争力，突破全球就那么几家公司掌握技术，其中又只有极个别的一两家处于垄断地位格局，缩短与国外先进制造水平差距，通过自主研发，摆脱受制于人的尴尬局面。

航空发动机质量的提高是建

立在大胆实践、勇于创新和突破各项关键技术基础上的，航空发动机制造技术的标志性指标为：复合材料质量公差 $\leq 3\%$ ，轮廓度变化率 $\leq 0.008\text{mm}$ ，满足超声波等无损检测要求。

### 4. 产学研结合

高等院校与企业结合，走工程化创新之路（见图2）。加强基础研究和预先研究，解决航空发动机制造技术难点，不断迭代解决技术问题，实现理论创新、技术创新。

### 5. MBD技术

随着数字化设计与制造技术在航空制造业的广泛应用，特别是三维数模软件的开发，航空发动机零部件制造技术模式正在发生根本性变化，传统的以数字量为主、模拟量为辅的协调工作开始向全数字量传递的协调工作迈进，三维数模已经取代二维图样，基于模型的数字化制造——MBD（Model-Based Definition）成为新机研制的唯一制造依据（见图3）。

目前，三维数字化模型没有完全贯穿于整个航空发动机数字化制造过程中，部分企业制造过程依旧以二维工程图样作为技术

依据。即在制造过程中把三维数字化模型转化为二维工程图样，作为工艺规划和指导生产的依据，数控程序不是依据MBD，而是以二维图样作为主要数据传递手段，任何三维设计的变更，都将带来繁琐的二维更新与新数据发布。这种方式不仅效率低、周期长，还可能造成数据的不一致、镜像等带来现场生产错误，产品质量难以提高。基于MBD技术的数字化工艺设计、产品制造模式和管理规范是三维数字化设计制造一体化集成应用前沿技术，需在航空发动机制造技术中广泛应用（见图4）。

### 6. 知识共享

现代航空发动机制造技术系统高度集成，要保证高度集成的系统顺利研发，首先就要建立起各专业多个项目的研发，将专业和项目进行统一的管理，便于知识的积累（见图5）。

### 7. 技术路线

选材，立足国内，以提高国内高温环氧树脂、增强碳纤维及预浸料等复合材料的国际竞争力。

设计与工艺制造并行，按照航空发动机零部件结构数模进行铺层设计、初步强度分析，同时根据工艺制造反馈不断迭代，确定模具型腔，给出模压余量，确定模具尺寸。

优化工艺制造参数，按照实际情况逐步调整工艺参数，通过多批次的工艺试制，最终确定模压工艺参数。

### 8. 结语

航空发动机制造技术的发

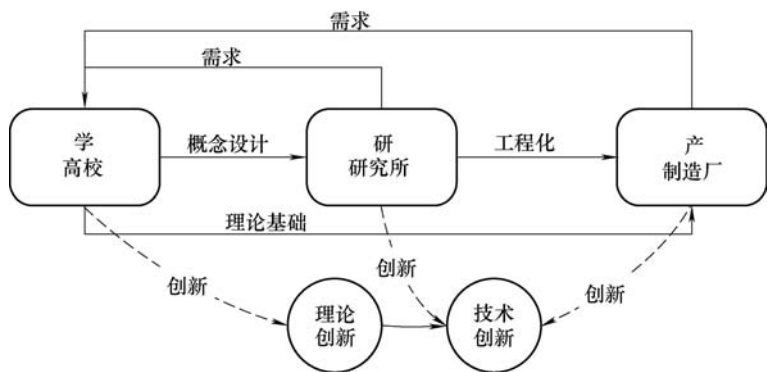


图2 产学研结合

# 应用 MBD 技术的意义

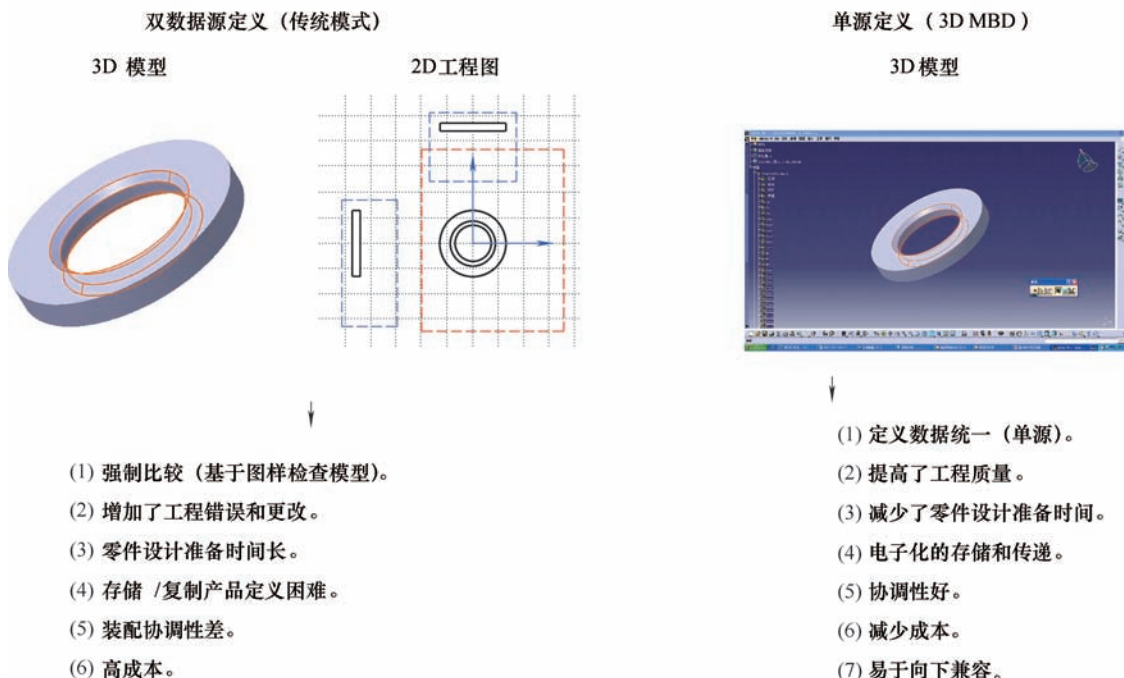


图3 MBD设计与制造技术

## 祝邦® 北京祝邦新技术研究所（高新技术企业）

### 替代汽油、柴油高效清洗机械零件

金属材料零件用水基清洗剂试验方法依据权威部门HB-5227-82部颁标准检测分为4级(0、1、2、3)，0级最优。本所清洗剂被评为0级。

#### 特征：

- 弱碱性、不伤皮肤，不加热清洗机械零件重油污。
- 除污能力强：本品1公斤加40-200倍清水搅匀，相当40公升汽油的除污能力。
- 无污染，连续使用无需排放，不足可补充

#### 实例：

- 清洗机床、汽车、拖拉机零件油污。
- 清洗采油钻井平台以及沙滩原油。
- 清洗航空发动机涡轮叶片燃烧残存油污。
- 清洗运输原油油罐车阀门。
- 清洗石油天然气设备及家用抽油烟机黏油，洁净不粘手。



### 金属填补胶

早在上世纪70年代中期国家有关部门为降低我国铸件废品率确定金属填补胶研制项目，由本所所长刘俊邦高工（国家有突出贡献专家、北京市劳动模范、市科技先进工作者）课题组承担，1981年曾参加联合国在波兰召开的金属填补胶技术交流会，经多年的研制与应用实践，于1983年获得成功，并获部级科研成果奖。这一实用技术经多年广泛应用，形成ZB200金属填补胶系列产品。主要用于修补金属铸件的砂眼、气孔铸造缺陷；修复机床导轨划伤及汽车缸盖缺陷和缸体裂纹；修复水泵壳体、气轮机密封环的穴蚀；修补金属容器、管道、水暖器材的跑冒滴漏。该胶室温操作无需加热，固化后粘接牢固，可高温125℃~200℃使用，修补处软硬适度，耐磨、减摩性好，并可进行车、铣、刨、磨、锉、钻孔套扣等切削加工。

### 化锈防锈液

本品系酸性溶液，是去除金属锈斑专用清洗剂。其突出特点：

- 去除金属锈斑彻底，除锈能力强。除锈后的金属表面形成磷化钝化保护膜，不易生锈。
- 对钢材不产生氢脆，无过腐蚀现象。
- 可用浸泡、涂刷、喷等方式除锈，操作简便。
- 废液易处理，可连续使用，无毒不燃，不污染环境，接触皮肤无伤害，使用安全。

◆ 广告 查询编号：1948

地址：北京市西城区育新街清芷园10A-301 (100054)  
电话：010-83502255、83502521

http://www.bjzhubang.com E-mail: zb-llc@sohu.com  
联系人：刘立晨 手机：13801024443

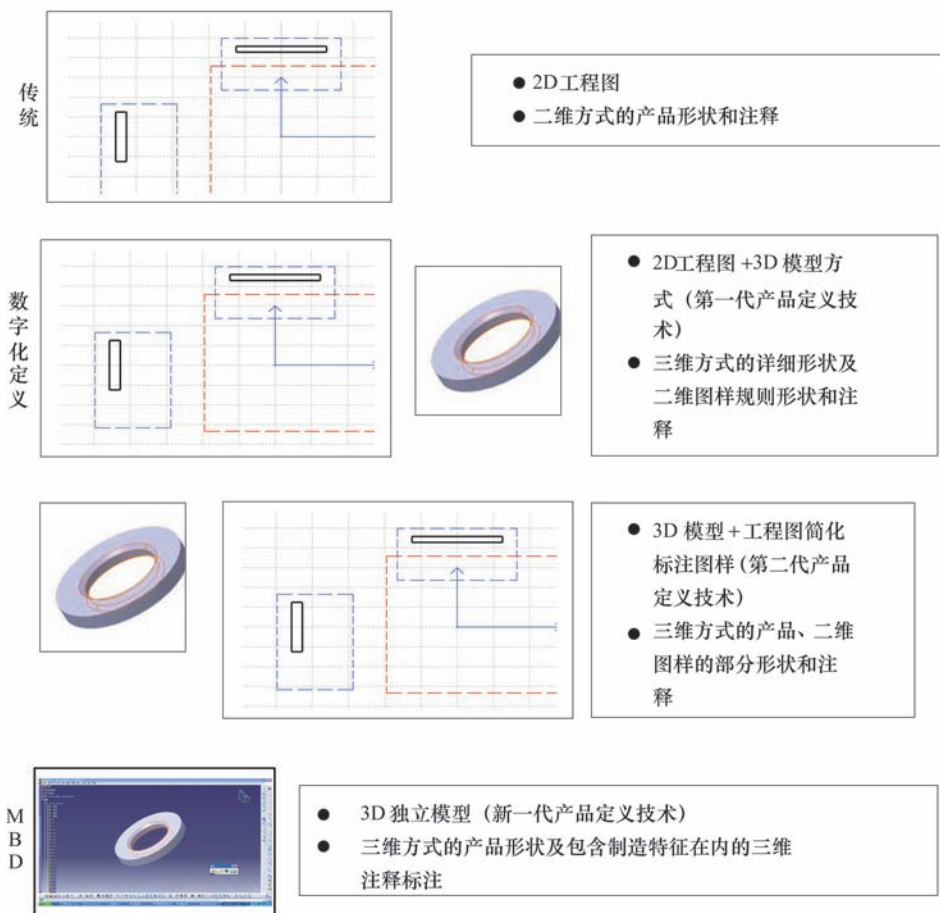


图4 数字化制造技术

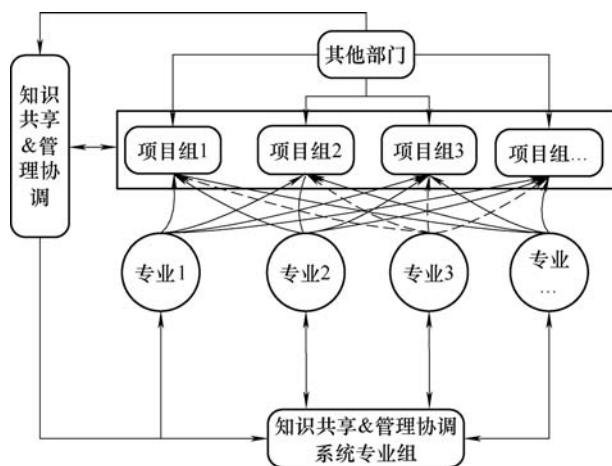


图5 各项目与专业管理

展既面临着宝贵契机，又承受着巨大的挑战，美国在其国家关键技术计划中如此描述航空推进技术计划：“这是一个技术精深得使新手难以进入的领域，它需要

国家充分保护并利用该领域的成果，需要长期数据和经验的积累……”。我们要围绕新材料、新工艺等重要问题，推动航空发动机零部件工艺的基础理论和关键

技术研究体系建立，推动我国航空发动机制造技术实现跨越式发展。

#### 参考文献：

- [1] 刘长福，邓明. 航空发动机结构分析[M]. 西安：西北工业大学出版社，2006.
- [2] 丁立铭. 21世纪航空制造技术将发生质的飞跃——谈高推重比发动机的关键制造技术[J]. 航空制造技术，2002（1）：53-62.
- [3] 张津，洪杰，陈光. 现代航空发动机技术与发展[M]. 北京：北京航空航天大学出版社，2006：38-66.

MW（收稿日期：20171016）