

## 航空发动机传动的“关节”——轴承

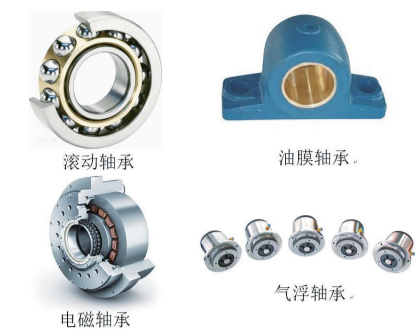


图1 几种常见的轴承。

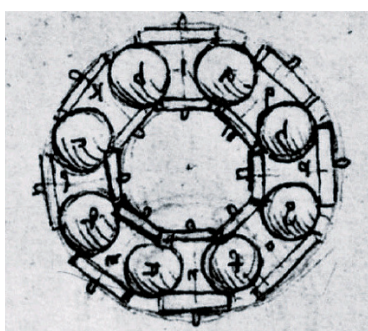


图2 达·芬奇绘制的轴承手稿。



图3 大型球面滚子轴承。

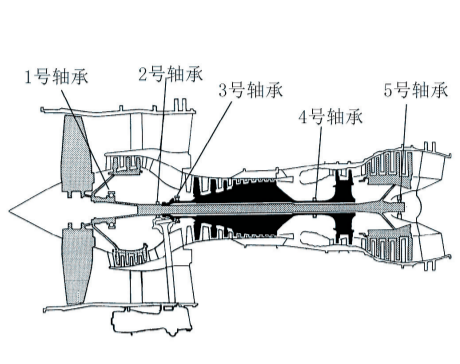


图4 商用航空发动机的主轴承位置。

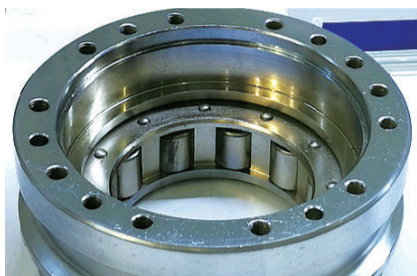


图5 航空发动机附件传动齿轮箱轴承。

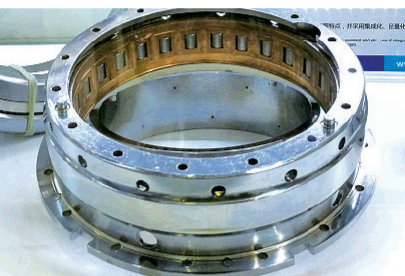


图6 航空发动机主轴承滚子轴承。

顾名思义，轴承就是给各种轴类结构（如转轴、心轴、传动轴）起支撑作用的部件的总称。从原理上说，轴承是把具有相对转动，或者允许有相对转动的两个部件之间联系在一起，以高效、平稳地实现支撑作用。轴承就像实现肢体运动的关节一样不可或缺，人们形象地把它比作机械系统的“关节”。现代工业中，较为常见的轴承类型有滚动轴承、油膜轴承、电磁轴承、气浮轴承等（如图1）。

值得指出的是，轴承的雏形很早就已经形成了。在没有大型动力设备的古代社会，人们为了移动大型石料，通常在其底部放置若干圆木，推动石料，利用圆木的滚动实现石料的前移。这种朴素的思想所蕴含的基本道理与现代滚动轴承的设计初衷是一致的。文艺复兴时期伟大的画家和科学家达·芬奇就在绘制的手稿中展示过他所构想的轴承（如图2）。可以看出，这种设计与现代滚动轴承的结构非常接近。

随着近代工业文明的到来，轴承迎来了发展历史上的春天。巨大的需

求推动着轴承技术高歌猛进，也成就了轴承工业的蓬勃发展。单就滚动轴承而言，种类繁多，甚至可以用眼花缭乱来形容。它的体量跨度很大，大者直径可达数米（如图3），小则只有借助放大镜才能完成装配过程；它的转速范围很宽，从静止到每分钟上百万转的转速都可以运转自如；它的应用范围很广，天上的飞机、火箭，地下的汽车、轮船，地下开掘隧道的盾构机等都离不开它，其踪迹可谓“上穷碧落下黄泉”。

通常来说，滚动轴承由滚动体、保持架、内滚道和外滚道组成。此外，为了防止润滑油的泄漏和污染，密封圈也是很多滚动轴承都会装配的零件。根据滚动体、保持架、内滚道、外滚道的结构形状、材料、装配形式等的不同，滚动轴承可以进行不同的分类。比如，以滚动体的结构形状进行分类，滚动轴承可以分为：深沟球轴承、角接触球轴承、圆柱滚子轴承、球面滚子轴承、圆锥滚子轴承和推力圆锥滚子轴承等。此外，为了能承载较大的载荷，有些滚动轴承还会做成

两排或多排的形式，如双列角接触球轴承和四列圆锥滚子轴承。

航空发动机是现代工业技术的集大成者，轴承在航空发动机中发挥着重要的作用。综合考虑传动效率、结构可靠性、振动、润滑等方面的要求，航空发动机采用的轴承主要是滚动轴承。而且滚动轴承集中应用在两个主要部位——传动系统和转子系统（如图4）。

航空发动机传动系统中所用的轴承与其他领域应用的普通轴承相比，结构相似，但是转速比较高，对重量和可靠性的要求也更加苛刻，如图5所示是航空发动机齿轮箱中所用的轴承。另外，某些大涵道比涡扇发动机所采用的齿轮驱动风扇结构，也是采用滚动轴承实现行星架和行星齿轮之间的运动联系。

航空发动机转子系统轴承支撑着整个发动机最核心的系统，是发动机中最重要的轴承，通常称为主轴承。航空发动机主轴承具有转速高、工作环境温度高、载荷复杂的特点。如果把航空发动机转子系统比作一位跳芭蕾舞的舞者，主轴承就是她的足尖，优雅的旋转、绝佳的平衡莫不与其息息相关。正如精湛的舞姿需要付出超常的努力一般，主轴承也是经过了千锤百炼以后才练就了一身绝技。科学家和工程师们本着“亲量圭尺，躬察仪漏，目尽毫厘，心穷筹策”的科学精神与工匠精神，克服了材料选择、结构设计、润滑设计、可靠性设计等诸多难题，才成就了主轴承超凡的工作性能。

根据滚动体的形状，主轴承可以分为圆柱滚子轴承（如图6）和角接触球轴承。但它们与其他旋转机械中相同类型的轴承有明显的区别。通常来说，无论是圆柱滚子型主轴承还是角接触型主轴承，结构都比较复杂。主轴承的外圈通常会加工出一些特殊的结构，这样处理既可以减重，又便于与发动机其他部件进行装配。此外，轴承的内环通常做成分半式的，这种设计不仅是为了便于装配，更重要的是使轴承在承受机动载荷时仍能实现平稳可靠的支撑作用。

实际上轴承绝不仅仅是大家通常所见到的几个组件装配而成的结构，这个小部件也有一个大世界，它涉及材料、工艺、运动学、动力学、摩擦学、传热学、流体力学等诸多方面，而这些通常看不到的技术细节才是决定轴承性能的关键。轴承这个小部件之所以能发挥这么广泛而重要的作用，与科技工作者们精益求精、追求完美的精神是分不开的。（张学宁）

## 航空发动机“医生”——健康管理系统

航空发动机是飞机的心脏，发动机的性能和可靠性直接关系着飞机的性能和安全。由于发动机结构复杂且工作环境恶劣，发动机在试验及使用过程中面临诸多故障，健康管理系统作为航空发动机的“贴身医生”，实时跟踪发动机状态，并针对可能发生的故障提出具有建设性的解决方案。

## 基本概念

健康管理一词来源于医疗保健领域，在发动机行业中，健康管理是指利用先进的传感器技术获取发动机的数据信息，利用先进的信息技术、推理技术来评估发动机自身的健康状态。在发动机故障发生前进行预测，并结合可利用的资源提供一系列的维修。

发动机健康管理技术是从发动机状态监视和故障诊断技术发展而来，经历了由简单向复杂、由低级向高级、由离线诊断向实时监视、由单一向综合化、智能化的发展过程。从国外的角度来看可以把该过程分为三个阶段：

**20世纪60-70年代：萌芽阶段。**在20世纪60年代末国外开始研究发动机状态监视和故障诊断系统，70年代开始在民用航空发动机上应用。70年代后期，战斗机发动机也开始装备状态监视和故障诊断系统。随着电子技术和计算机技术的迅速发展，大大促进了航空发动机和燃气轮机的状态监视和故障诊断技术的发展。

**20世纪80-90年代：发展阶段。**从20世纪80年代以来，国外的各种发动机的状态监控与故障诊断系统陆续投入使用，1985年美国研制了CETADS系统，用于航空发动机的故障诊断后，发动机健康管理的概念才开始提出并得到迅速发展。到21世纪初，欧美等国在波音777、空客A380及JSF项目中提出并实施了健康管理技术，标志航空发动机的“视情维修”和安全性、维修性和经济性监控已进入了一个新的阶段。

**21世纪：广泛应用阶段。**近十年来，航空发动机状态监视与故障诊断技术得到了快速的发展。健康管理系统主要包括健康状况分析、故障诊断、趋势分析和发动机寿命分析四个模块，完成航空发动机的机械系统和气动热力系统的实时监控和诊断、传感器故障诊断隔离以及发动机健康状况和工作寿命预测等任务。随着健康管理技术应用的推广，技术成熟逐步提高，为发动机使用维护带来的效益已非常显著。

## 使用模式

航空发动机健康管理系统包括机载子系统和地面子系统两个部分。机载子系统通过对传感器采集数据的分

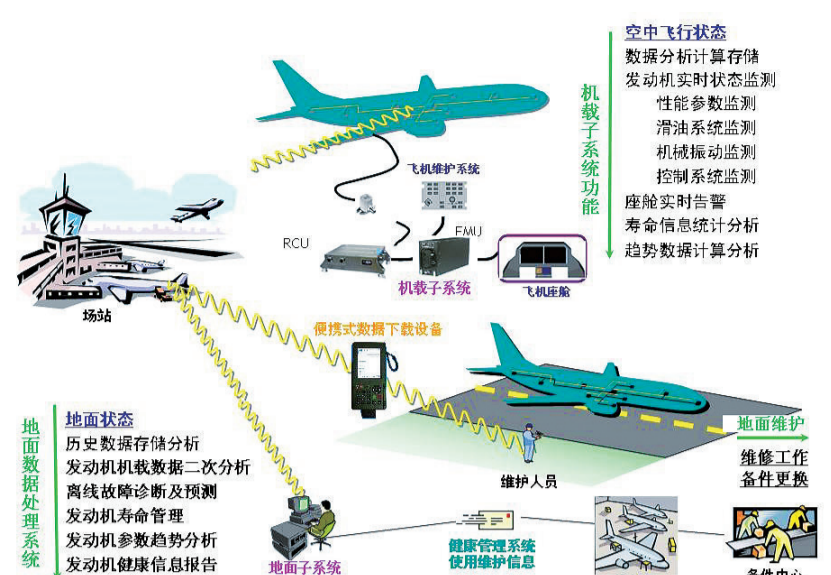


图1 健康管理系统使用模式。

析处理，实现对发动机的状态监测功能，并将重要的告警信息及时地反馈给飞行员；同时通过诊断分析算法对收集的数据进行分析，实现发动机的故障诊断、趋势分析、健康管理等功能，最后把采集及分析的数据通过卫星等无线发射装置把数据传输给地面子系统。

地面子系统接收到机载系统的数据后，进行数据的存储管理和二次分析，生成发动机健康信息报告并把报告发送给发动机维修中心，维修中心根据发动机的健康状况提前准备条件和制定发动机维修方案，这样可以大幅减少备件数量，降低维护成本，缩短维修时间，实现发动机由定期维护向视情维护的巨大变革。

## 功能组成

如图2所示，健康管理系统按功能可以分为状态监视、故障诊断、趋势分析、寿命管理四个部分。

状态监视功能是在分析机载实时获取的发动机参数，对参数与机载发动机模型进行对比分析，判断参数是否存在超限和异常增量特征，将判断结果记录在机载事件报告中，飞行结束后将报告发送给地面系统，指导维护人员开展相关检查和维修工作。

故障诊断及预测功能一般是由机载和地面故障诊断算法共同实现。机载故障诊断模块通过特征提取算法对参数实时分析，提取超限特征和增量异常特征，并将参数异常特征与部件、系统故障模式的参数值进行实时匹配，计算故障概率，生成机载故障报告。在飞行结束后，地面系统将根据下载的机载数据，采用基于发动机数学模型诊断算法、智能故障诊断算法或基于历史数据的故障诊断算法等算



图2 健康管理系统功能组成。

## 罗罗ALECSys系统进行结冰测试



3月23日，英国航空发动机制造商罗罗公司表示，将用于未来的喷气发动机项目的新型贫预混合低排放燃烧室，正装备在一台高达1000吨的测试台上，在加拿大进行结冰测试，测试温度在-20℃。

ALECSys系统，全称为先进低排放燃烧系统（Advanced Low Emissions Combustion System）的首次运行测试是1个月前，在英国德比的试验基地。

ALECSys系统是罗罗公司未来智能发动机愿景的重要组成部分，也是罗罗正在大力发展的新型涡扇发动机Advance3和UltraPan的重要特色技术，罗罗表示它将结合先进发动机技术和数字技术，为客户带来收益。

罗罗表示，通过不断地监测飞行环境条件和飞行员的推力要求，ALECSys系统可以改变输送到各个喷嘴的燃料和空气的混合比，从而最大限度地减少NOx和其他排放物。与目前的发动机排放水平相比，测试显示在巡航飞行状态下，NOx的排放减半。

罗罗公司首席工程师兼技术项目主管Andy Geer表示：“这是ALECSys项目的又一重大举措，我们

的计算机数学模型让我们深入了解系统如何在极端寒冷环境下工作，而此次的一系列测试将从物理上对它进行验证。相信这将为我们的客户带来显著的收益。”

ALECSys项目已经获得了欧盟Clean Sky SAGE（可持续发展和绿色发动机）计划的资助，目前ALECSys系统是装在一台高达1000吨的测试台上进行试验。罗罗公司其他关键的技术里程碑还包括：Advance3发动机试验样机，其有与UltraPan发动机相同的样机，已经于去年11月份首次运行；UltraPan发动机将使用的动力齿轮箱，在去年9月份的试验中达到了7万马力，创造了一项航空航天的纪录。罗罗公司表示，UltraPan发动机是齿轮传动，并且可扩展设计，同时适用于宽体客机和窄体客机的动力需求，与第一代罗罗达达发动机相比，其燃油效率提升超过25%。

罗罗公司正在发展未来20年所用的发动机技术，重点是涵道比超过15:1、总压比超过70:1的发动机技术，工作涉及至少10个方面内容：中压和高压压气机（IPC和HPC）架架试验，Advance3核心机，高功率变速齿轮箱PGB，陶瓷基复合材料（CMC），贫油燃烧室（LCB），碳-钛（CTI）风扇，研究中心，UltraPan以及高温技术等。

同时，罗罗公司也在其总部德比建设全球最大的室内发动机试验台，面积将达到7500平方米，与足球场大小相当，预计在2020年投入使用，不仅可用于现有的高达XWB和高达1000等发动机，还包括未来的新型发动机UltraPan。（宗合）

## 微型燃气轮机分布式供能的应用优势

燃气轮机技术门槛高、研制周期长、经费投入大、产品附加值高、产业链长，是衡量一个国家科技水平的重要标志之一。

微型燃气轮机与重型燃气轮机相比，应用更广、需求量更大，在军用电源、直升机动力、车船动力、分布式供能及工业驱动等领域均有着广阔的市场前景，对大幅度提升我军武器装备技术水平与作战能力和降低PM2.5、NOx及SO2等污染物的排放具有重要意义。

分布式供能系统通过靠近用户的能源利用设施，为终端用户提供灵活、节能型的综合能源服务，具有节能环保、能够梯级利用或可再生能源综合利用等特点，可有效减少中间环节损耗，降低对环境的负面影响，对于能源安全也具有重要意义。

分布式供能系统的核心动力是指燃气轮机、燃气内燃机、太阳能、风能、斯特林外燃机、余热制冷机组等设备，微型燃气轮机作为其中重要的一种供能设备有着许多优势。

以微型燃气轮机生产厂家Capstone公司为例，该公司成立于1988年，占有世界微型燃气轮机市场超过80%的份额。Capstone微型燃气轮机是基于航空发动机技术开发出来的、应用在地面固定式发电的一种微型燃气轮机发电机组。作为最早研发也是目前最成功的微型燃气轮机，Capstone微型燃气轮机集航空涡轮发动机技术、高效军用回热器技术、高速空气轴承技术、高速永磁发电技术、清洁超低排放技术、高度集成的数字电力转换技术等核心技术于一体。

整台机组只有一个运动部件，结构更加紧凑；机组采用空气冷却，无需润滑油和冷却液，几乎无运行维护费用；另外，机组能够适应多种燃料，

排出的烟气具有较高的余热，可以回收利用，整套模块化设计，便于自由组合使用。

## 排放低、综合效率高

微型燃气轮机作为21世纪的新兴技术蓬勃发展。目前，市场上生产和销售的微型燃气轮机主要厂商有Capstone、AlliedSignal（现已被Honeywell并购）、Turbec（现已被Ansaldo并购）、IngersollRand（现已被Flex Energy收购）、Elliott、Solar、GE、Siemens等公司。这些公司的产品普遍具有较高的循环效率和极低的污染物排放，其尾气中的NOx含量一般在9~30ppm，远低于柴油机。

这使得微型燃气轮机应用在环境要求高的区域有非常高的竞争力。燃气轮机供能系统通过对热能的梯级利用，可以实现对应用项目的冷热电联供，其系统整体效率也非常高，这就是为什么越来越多的医院、机场等设施开始布置燃气轮机分布式供能系统的一个原因。

## 布置灵活

微型燃气轮机系统普遍具有功率密度大，相对同功率柴油机组体积小、重量轻的特点，再加上燃气轮机良好的燃料多样性，布置起来非常灵活。在一些天然气资源丰富的地区（如油气田）可以就近采用，甚至生物质气等也可以在稍加处理就能使用。

我国曾在北京奥运会、上海世博会、神七发射、全国两会等任务装备移动式燃气轮机发电机组，该机组功率为1.6MW集成在一个集装箱中，可由一辆普通货车运载移动。通过这一套机组可提供通信领域应急发电、海上平台发电、分布式供能等服务。

## 环境适应性好

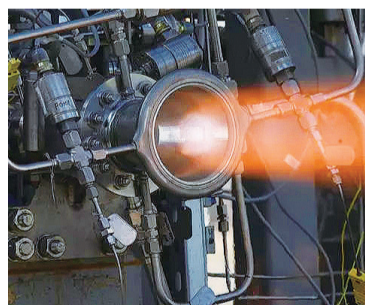
柴油机在寒冷的冬季启动需要进行热机，以使它达到正常工作状态，如果在极寒地区，热机的时间就会非常长，甚至设备本身无法启动工作。而燃气轮机的工作特性使得它可以在一分钟内达到最大功率；在高海拔地区，大气压力和大气温度均低，前者使功率下降，后者则使功率下降的程度变小，且使效率提高。而活塞式内燃机在高海拔地区功率下降严重。因此，燃气轮机机组更适用于高海拔地区，可以应用在很多边远和环境恶劣地区，为这些地区的能源供应提供保障。

## 先进燃气轮机稳定性好

传统的活塞式柴油机具有多个气缸，除曲轴外还有连杆、活塞、排气机构等很多运动件，系统复杂度高，一个零件出现问题都会对整个系统的运行造成影响。而上例中Capstone公司的燃气轮机，整套机组只有一个运动部件，结构紧凑，故障率低；机组采用空气冷却，无需润滑油和冷却液，几乎无运行维护费用。这样稳定性和宜维护性降低了客户的后期使用成本，提高了整个供能系统的可靠性。

NavigantResearch发布的研究报告显示，2015年全球分布式供能新增装机容量约为136.4GW。预计到2024年，全球新增分布式供能装机容量有望突破530.7GW。而在中国，燃气轮机的优势在逐渐体现，国家和地方政府也加大对燃气轮机发电的补贴和支持。作为分布式供能的一个重要能源供应方式，微型燃气轮机因其特有的性能优势，必将在分布式供能这一快速发展的领域得到发展和应用。（毛磊）

## 马歇尔航天中心推进3D打印火箭发动机喷嘴技术



NASA采用3D打印制造的火箭发动机喷嘴在马歇尔航天飞行中心进行了热火测试，喷嘴在高温燃烧室压力和温度下累积运行超过1040秒。由于火箭发动机喷嘴的热壁厚度仅为几张纸的厚度，而且在运行过程中必须承受高温和压力，所以制造工艺复杂且昂贵。因此，NASA马歇尔航天飞行中心的工程师们开发并验证了一种新型喷嘴制造技术，可以大大降低成本和开发时间。

NASA开发了一种名为“激光定向封闭”（LWDC）的新工艺，用于在更短的时间内建造一个低成本喷嘴。与大多数3D打印技术相比，LWDC是一种不同的工艺，其基于粉末和层状制造，它采用一种自由定向能量线沉积工艺来制造材料。这一新的NASA专利技术有可能将建造时间从几个月减少到几个星期。

为了冷却喷嘴，在喷嘴内制造了一系列冷却剂通道，且为了控制高压冷却剂，这些通道必须密封或密封。新的LWDC工艺采用了一种基于线添加剂的制造工艺，可精确地封闭喷嘴冷却剂通道，并形成了一个支撑套，保护壁不受高温的影响。（梁坤）