

# 国外航空发动机无损检测技术发展

中国航空工业发展研究中心 陈亚莉

**摘要：**本文对国外航空发动机无损检测技术的特点、无损检测技术的发展现状与趋势进行了综述。

**关键词：**航空发动机；无损检测

航空发动机是飞行动力的提供者，无论是飞机的安全性，还是其自身极端苛刻的工作状态(高温、高压及高载荷)，都给发动机各部件的品质提出了严格要求，因此，航空发动机的重要、关键部件都必须经过可靠的无损检测。

## 1. 航空发动机无损检测技术的特点

随着发动机性能的进一步提高，将面临更严酷的工作环境的挑战。航空发动机无损检测呈现出如下特点。

### 1.1 无损检测是航空发动机零部件风险评估的有力工具

根据美国空军发动机损伤容限要求，80年代初美国空军提出的新型航空发动机设计及选材标准，要求发动机关键部件必须具有优良的损伤容限特性。以涡轮盘为例，已由强度为标准设计进入以低周疲劳为依据进而又以裂纹 $da/dN$ 为依据的损伤容限设计。近年在粉末盘中又引入了以夹杂物大小和分布为重要依据的统计力学和概率方法。因此对于发动机进行风险评估至关重要。

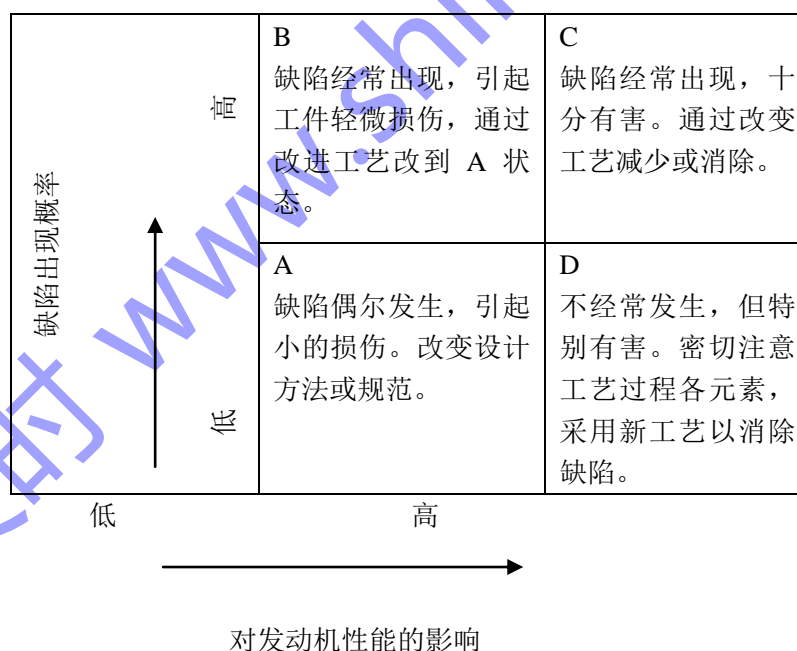


图1 航空发动机风险评估图

图1是发动机风险评估图，描述了缺陷出现的频率与对零部件质量影响严重程度的关系，而无损检测是评估这种风险的有效工具。从图中可以看出，影响B、C区的缺陷出现频率为高到中，D区的缺陷影响很严重，可以通过改善及控制工艺来消除。

### 1.2 传统的三类五种检测方法仍是航空发动机无损检测的主流

航空发动机有三类无损检测方法：表面、表面/近表面、表面以下。常用的五大检测方法（超声、X射线、涡流、磁粉、渗透）适用于发动机的不同部件。

### **(1) 涡流及磁粉检验是主气流通道零部件广泛应用高度可靠的方法**

通用的表面无损检测法有：表面观察、表面平滑度测量、显微镜法（根据可撕下的塑料薄膜）以及着色渗透检验（特别是与表面相连的不连续性如铸件缩孔、裂纹等）。对表面以及近表面深度（例如0.125mm）检查的方法，涡流检验法是主气流通道零件广泛应用的、高度可靠的方法。磁粉检验是磁性材料如轴承、齿轮及轴的磁场破坏的非常有效的方法。

### **(2) X射线检验法是大多数转动件及静子件皮下检验最有效的方法**

X射线检验是用作表皮以下检验的原始的但有效的方法。大多数铸造转动件及静子件均用X射线来检验疏松及其他密度受破坏的缺陷。空心叶片孔道的定位也可用X射线检验。

### **(3) 超声检验是所有盘件经济可靠的安全检验方法**

超声检验可检查表皮下的缺陷。尽管应用成本高，但由于可以延长在机上的时间并确保零件的安全和设计寿命，因而经济效益高。例如所有的盘在最后切削加工前均要用切取的方形（声形）标样进行超声检验。超声在改进安全性及成本最低化方面功不可没。

出现频率很低但危害性大的缺陷的检查是影响材料发展以及结构高度完整性的关键挑战之一。从航空发动机零部件的无损检测来看，上述三类检验五大方法（超声、X射线、涡流、磁粉、渗透）与机械制造业大体相当。其中着色渗透检验及磁粉检验大约占有所有检验的一半，超声及X射线占第三位，涡流检验占10%，其他只占2%。但随着复合材料在现代及今后发动机中应用的增加，涡流检验将减少，将开发复合材料用的电磁检测技术。

## **1.3 新型无损检测技术浮出水面**

随着新型发动机材料与结构的不断出现，无损检测技术的发展与应用呈现出多种方法与技术综合应用、一些快速、实时的新方法和新技术不断出现的特点。

## **2. 各种航空发动机无损检测技术的发展现状**

在航空工业应用中最普遍采用的有超声、X射线、涡流、磁粉、渗透五种方法。此外还有红外检测、计算机层析成像检测和错位散斑干涉检测等多种新的无损检测方法。

### **2.1 表面检测**

表面检测是指能对材料或零件表面缺陷进行检测的无损检测方法，通常包括磁粉检测、渗透检测和涡流检测。在传统的涡流检测方法基础上，国外近年开发出一些新的衍生方法。主要包括以下方面：

#### **(1) 涡流热成像法检验**

航空涡轮发动机零部件近几年来越来越多采用热成像法进行裂纹检验，将热成像与涡流检验联合应用，可形成一种涡流热成像检验法。

涡流热成像法用50~200ms高频脉冲将零部件加热到一中等、特定的温度。裂纹使感应电流受到干扰，影响零部件表面上的温度分布，在裂纹尖端有一温度较高区，而在裂纹侧面有温度较低区，从而可以用热成像仪对裂纹进行观测。

这种方法的显著优点是可以检测被污染的裂纹或涂层下的裂纹。该法非常适用于发动机叶片的维修。因为目前在发动机维修时需剥离叶片涂层，进行裂纹检测并重新涂层。据称涡流热成像法不久将在生产应用中成为实用、快速和可靠的检验法。

除用涡流热成像方法检测裂纹外，还可用电压降技术测定单晶合金的裂纹扩展速率。电压降是电流通过电阻时产生的电压差，根据这一原理可用来测定单晶

合金的裂纹扩展速率，用作合金的使用寿命预测。

### (2) 高频涡流检验

航空发动机盘表面须喷丸以延长使用寿命，而残余应力在工件服役过程中因热松弛而消失，因此可用无损检测法来监控在寿命期的残余应力状态从而预测零部件的寿命。

MTU航空发动机公司对此进行了研究。采用100kHz~100MHz的频率用于测定50~500 $\mu$ m近表面的电导率。

为实施上述检测方法，德国弗兰荷夫无损检测研究所开发出高频涡流检验用仪器，可以用作频率100MHz以下的精密涡流检测而无需网络分析器。

## 2.2 射线检测

用X射线探伤可以检测航空发动机各种孔洞类、裂纹类、夹杂类缺陷。然而，该法只能对构件进行局部截面分析，检测速度慢，成本很高。为此，近年出现了一些新的射线检测技术。

### (1) 数字化X射线检验

在发动机工件的检测中发挥了重要作用。空心涡轮叶片的冷却常用X光检验，一般要用X光胶片，不仅费时而且不可靠。目前，射线检测领域的研究热点之一是利用计算机处理和分析X射线数字图像并自动获取被测试件的缺陷，这些方法可以较好地使X射线数字图像中提取被测试件的缺陷。如英国X-Tek工业公司开发的VENLO系统，探测器有700多万个像素，用X胶片时，每块叶片曝光时间5分钟，胶片冲洗15~20分钟，而数字成像只需1~2分钟。每年大约节省10万欧元。

### (2) 中子射线检测

由于涡轮叶片的通道比较复杂，用肉眼或X射线照相技术无法发现残留的型芯，只有用中子照相才能做出精确的检查。由美国俄亥俄州的克利夫兰的XRI公司开发的方法是其中的典型例子。尽管中子的衰减与X射线很不一样，但可用X胶片成像，也可用CCD相机进行数字成像，并可对移动件进行实时成像。该方法已成功用于缺陷检验如裂纹、夹杂、孔隙、密度变化等。在飞机维修工作中，要检查通孔是否堵塞或破裂，也只有借助中子射线照相法。

随着价格相对低廉而又比较安全可靠的新中子源的获得，中子射线检测可能会逐渐成为一种比较常见的无损检测方法。

## 2.3 超声检测

传统的超声检测方法在航空发动机用树脂基复合材料、涡轮叶片测厚、热障涂层测厚以及焊接结构的无损检测中发挥了重要作用。该类技术近年取得了诸多进展。重要的有超声相控阵检测和声光成像技术等。

### (1) 相控阵超声检测

相控阵超声检验与传统超声检验相比，改进了探测的概率，并明显加快了检验速度。后者要用多个不同的探头来做综合性的体积分析，而相控阵检验用一个多元探头即可完成同样的结果，合成的超声束的入射角及焦点深度均可变化，速度比传统方法快得多。

GE检测技术公司开发了复合材料检测用的相控阵技术，采用UTxx先进缺陷探测器，该探测器采用NuScan成像软件包。UTxx相控阵机有128个元素探头，扫描速度达到20m<sup>2</sup>/h。

超声相控阵技术最初因系统的复杂性及成本高等原因（价格达10万美元），在工业无损检测中的应用受到限制，近年情况大有改观。动态聚焦相控阵系统、二维阵列自适应聚焦相控阵系统、表面波及板波相控阵换能器和基于相控阵的数

字成像系统等的研制、开发、应用及完善已成为研究重点。

除复合材料结构外，发动机锻件的检测也可采用超声相控阵检测技术。

### (2) 声光成像技术

在航空复合材料结构制造及使用中，常用超声来进行无损检验，但它与 X 射线检验不同，X 射线可一次进行大面积的检验，而超声检验时需对结构进行逐点扫描，费工费时。现行的超声检验速度慢，因此大多需要有复杂的多轴机械扫描装置来精确记录换能器的位置数据。现行的超声系统十分昂贵，这是因为需有专门化的设施和受过高度培训的人员来操作及诠释数据。虽然对大型、中度特型结构来说，使用这种超声系统还是合算的，但对较小的以及几何形状复杂的结构来说，成本仍嫌过高。如果用下一代的声成像技术来对复合材料结构进行超声检验，则可像实时的 X 射线成像技术那样对大面积进行检验。

声光成像的核心是它的新颖的、超高分辨率的、有专利权的声光(AO)传感器，该传感器可将超声直接转化成可视图像，声光成像技术分为穿透式及单面式两种。

### (3) 空气耦合超声波技术

对于不能暴露在水环境中的复合材料，如 C/C 及陶瓷基复合材料，采用以空气作耦合剂的超声检验。斯图加特大学用空气耦合超声波 C 型检测法对 C/ SiC 材料做了测试，可以清晰地看出其预制的分层缺陷。德宇航院对 C/ C-SiC 材料的前驱体、中间体和成型构件进行了空气耦合超声波和调制加热红外的无损检测。

## 2.4 其他新型无损检测方法

除传统的三大类无损检测方法之外，近年无损检验技术有了重要的进展。包括如激光超声、泄漏兰姆波、红外热成像以及激光错位散斑等。

### (1) 激光超声检测

激光超声是一种新型的无损检测方法。目前激光超声主要用于检测复合材料结构。在发动机用涂层的检测方面，激光超声法具有极大潜力。德国 Fraunhofer 研究所开发的 Lawave(激光声波)技术，可在 3~4 分钟内测量薄膜的厚度、硬度、弹性模量及波松比。该仪器的潜在应用范围有陶瓷涂层的厚度、硬度测量，聚合物涂层的完整性测定，材料表面改性的鉴定等。

### (2) 激光电子剪切成像

这种检测方法采用单束光，测量分析的是局部位移场，对环境振动和被测结构整体变形不敏感，因此，特别适合航空发动机用焊接、复合材料结构、胶接结构等各种场合的无损检测。

### (3) 热/红外成像检测

红外热成像检测方法很适宜于检测对热传导敏感的陶瓷基复合材料。与超声波和 X 射线检测相比，红外热成像的局限在于只能检测离材料表面较浅、直径较大缺陷的薄壁试件，其优点在于可以快速、非接触地检测面积较大构件，检测效率高。

在红外热像检测中，实现被检工件快速、方便、自动化的加热方式，加热源和热像头的自动扫描以及智能化地识别各种缺陷是今后发展的重要方向。

### (4) 振动热成像检验

美国弗吉尼亚理工学院开发了一种先进的复合材料损伤的无损检验法。该技术称为振动热成像法，以低幅高频机械振荡(15000~3000周/秒)为基本原理。振动施加于复合材料，然后对表面上的温度进行热成像。从而检测出复合材料内

部用目测不能发现的缺陷。

### (5) 摩擦发光检测

航空复合材料结构当其损伤时发出一种光。方法是在空心碳纤维中含有一种纳米颗粒的矿物，当受到损伤时，颗粒发出一种橘色或黄色光。这种性能叫做摩擦发光。当材料产生断裂时发出光使其易于检测内部损伤。目前研究用液体将颗粒加入到玻璃纤维中。

### (6) 量子诱生正电子湮灭检测

在射线检测领域，近年的一个新进展是采用量子诱生正电子湮灭法（PIPA）来检测表面处理工艺对零件显微组织的影响。该法用于航空发动机叶片喷丸强化后的无损检测。

PIPA可检测原子层次的工件损伤。采用一种线性加速器产生的光量子束穿透材料，产生的正电子被吸引到材料中的纳米尺寸的缺陷中。正电子与材料中的电子相碰撞而湮灭，并释放出 $\gamma$ 射线， $\gamma$ 射线光谱产生清晰可读的信号，该信号表征材料中缺陷的尺寸、数量及型别。

PIPA可以在裂纹萌生前鉴别缺陷损伤，也用于鉴定工件的剩余寿命。

### (7) 高温射频超导量子干涉器检测

超声检测在晶粒比较粗大的钛合金的检测中，会将一些组织反射的信号当成缺陷信号，造成误判。另外，对于小于0.4mm的缺陷是难以发现的，而X射线照相检测，受射线深度、照片、显影液、人工探针等多方面影响，对小的缺陷会发生误判或漏检，因此，目前国外在钛合金检测领域已逐步开始尝试采用高温射频超导量子干涉器(SQUID)弱磁场检测方法，该技术目前尚属前沿探索阶段。

## 3 航空发动机无损检测发展趋势

航空发动机在相当长时期仍将以金属结构材料为主，在冷端以树脂基复合材料为辅，因此无损检测方法和现在相比将保持相对稳定性。X射线、超声、涡流、渗透检验仍占主导地位。但随着金属基复合材料、陶瓷基复合材料和超高温材料的引入，无损检测方法将发生显著变化，会出现一些新的传感器。

在相当长时期内，X射线将向数字化、实时化发展。由于技术安全问题，有可能部分被超声法取代。

在超声检测方面将向相控阵、自动化、小型化、低成本化技术方向发展。

总的趋势是无损检测技术向速度更快、灵敏度更高、自动化程度更高、成本更低的方向过渡。因此采用取长补短、综合应用的方法，如应用涡流热成像、激光超声等新技术，将是无损检测技术的未来发展方向。

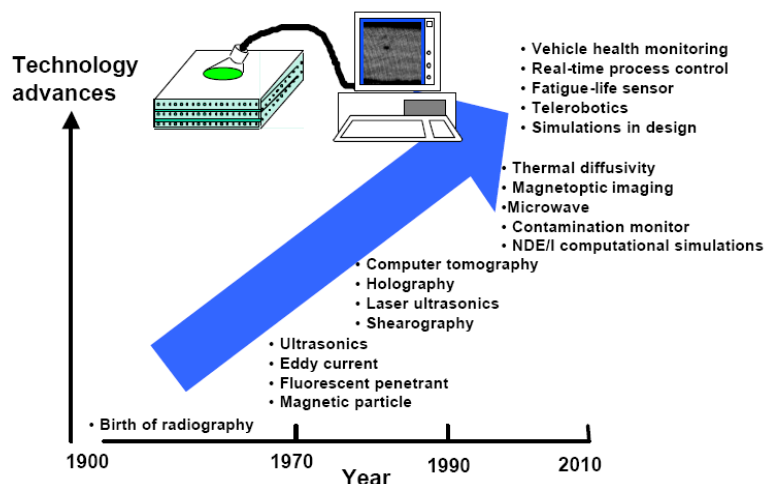


图2 航空无损检测发展趋势

Technology  
advances

图字：(1) 技术进展 (Technology advances) (2) 射线检测出现 (Birth of radiography) (3) 磁粉检测 (Magnetic particle) (4) 渗透检测 (Fluorescent penetrant) (5) 涡流检测 (Eddy current) (6) 超声检测 (Ultrasonics) (7) 剪切散斑 (Shearography) (8) 激光超声 (Laser ultrasonics) (9) 全息摄影 (Holography) (10) 计算层析摄影法 (Computer tomography) (11) 无损评估 / 检测计算模拟 (NDE/I computational simulations) (12) 污染物监测 (Contamination monitor) (13) 微波 (Microwave) (14) 磁光成像 (Magneto optic imaging) (15) 热扩散率检测 (Thermal diffusivity) (16) 设计中的模拟 (Simulations in design) (17) 遥控机器人 (Telerobotics) (18) 疲劳寿命传感器 (Fatigue-life sensor) (19) 实时处理控制 (Real-time process control) (20) 航空器健康监控 (Vehicle health monitoring) (21) 年 (Year)

#### 参考文献

- 1.P.J.Withers, “Residual Stress and its role in failure”, Reports on Progress in Physics, Vol.:70, Issue:12, Pages:2211~2264, December 2007
- 2.Y.Shen et al “Conductivity profile determination by eddy current for shot-peened superalloy surfaces toward residual stress assessment”, Journal of Applied Physics, Vol.:101, Issue1, No.:14907, January 2007
- 3.F.Yu et al “Eddy Current Assessment of Near-surface Residual Stress in Shot peened Inhomogeneous Nickel base Superalloys” JNDE, Vol 25, No.1, March 2006.3
4. .F.Yu et al “On the Influence of Cold Work on Eddy Current Characterization of Near Surface Residual Stress in Shot Peened Nickel Base Superalloys”, JNDE, Vol.25, No.3, September 2006