

# 某型发动机 2 级压气机叶片的涡流探伤方法

张海兵,袁英民

(海军航空工程学院 青岛分院,青岛 266041)

**摘要:**压气机叶片是飞机发动机的重要部件,根据叶片的特点,从原位探伤的角度出发,设计了最佳的涡流探伤方法。给出了合适的检测频率。根据叶片的安装部位,设计了专用的传感器。实际探伤结果表明,该方法探伤效果良好。

**关键词:**压气机;涡流探伤;叶片

中图分类号:TG115.28

文献标志码:A

文章编号:1000-6656(2011)02-0024-02

## Eddy Current Testing Method for Rotor Blades of Stage II Compressor

ZHANG Hai-Bing, YUAN Ying-Min

(Naval Aeronautical Engineering Academy Qingdao Branch, Qingdao 266041, China)

**Abstract:** The blade of aircraft engine compressor is an important component. The best method of eddy current testing was designed, and the appropriate testing frequency from the perspective of in-situ testing was given according to the characteristics of blades. Special sensor was designed based on the installation of blade parts. Actual testing results showed that the testing method was suitable.

**Keywords:** Compressor; Eddy current testing; Blade

压气机是燃气涡轮发动机中的核心转动部件,其工作的好坏直接影响发动机的性能及稳定性。压气机主要由机匣、转子叶片和整流叶片(静子叶片)三大部分组成。其中 2 级叶片是航空发动机结构件中的关键零部件之一。由于其为高速旋转的动部件,数量多、形体单薄、载荷状况严酷、工作环境复杂,致使其在发动机中一直被列为故障率最高的构件之一。在外场对某型发动机进行的定期检查中发现,叶片叶尖中部出现裂纹,随后又发现多起类似故障。为避免飞行事故,必须采用无损检测的方法来排除安全隐患。

## 1 叶片特征分析

依据压气机转子叶片载荷谱和工作应力分析,进行一系列的试验及计算分析。计算和测试结果表明,在低阶模态(尤其是第 1,2 阶模态),第 2 级压气

机转子叶片的最大振动应力点位于叶片根部或榫头部位;在高阶模态,基本上位于叶尖部位。

对在发动机工作状态下的叶片振动应力值进行实测,得到叶片的工作振动应力水平,并分析其振动疲劳强度储备,判断其是否满足强度规范的要求。动应力实测结果表明,第 2 级压气机转子叶片的振动薄弱部位在叶尖,危险振动模态频率在 4 000 Hz 以上,发生在过渡转速。因此,某型发动机 2 级压气机叶片主要的检测部位是叶尖。

## 2 检测方法选择

在叶片缺陷的检查中,超声波检测和涡流检测是两种常用的方法。超声检测方法受耦合方式和机械扫查机构的限制而在一些形状较复杂的构件上难以实施,不适合压气机叶片的原位检查。涡流探伤法对表面疲劳裂纹和亚表面腐蚀缺陷非常敏感,检测灵敏度高,探头可达性好,检测方便,所以经常用于飞机原位无损检测中。在此选用涡流探伤方法。

收稿日期:2010-03-25

作者简介:张海兵(1979—),男,讲师,研究方向为飞机损伤检测。

### 3 检测频率的选择

涡流检测所用频率范围从 100 Hz~6 MHz 甚至更大。大多数非磁性材料检测时采用的频率是数千赫兹, 检测磁性材料时, 采用较低频率, 例如 1 kHz。实际涡流检测所用的频率由被检材料厚度、所希望的透入深度、要求达到的灵敏度或分辨率以及不同的检测目的所决定。由公式  $f_g = 5\ 066/\mu_r\sigma d^2$  可得工件的特征频率  $f_g$  为<sup>[1]</sup>:

$$f_g = \frac{5\ 066}{\mu_r\sigma d^2} = \frac{5\ 066}{\mu_r\sigma(2.768\ 86r_b \times 10^{-1})^2} \approx \frac{66\ 079}{\mu_r\sigma r_b^2} \quad (1)$$

式中  $\mu_r$  为相对磁导率;  $\sigma$  为电导率;  $R_b$  为线圈的外半径。所用钛合金材料相对磁导率为 1, 电导率范围为 30~90, 设计线圈的外半径为 3.5 mm, 可求得:

$$f_g = (60 \sim 200) \text{ kHz} \quad (2)$$

在检测工件疲劳裂纹时, 其工作频率选择  $f = (10 \sim 50)f_g$ <sup>[2]</sup>, 由此可以算出检测工作频率在(0.6~10) MHz。

由于叶片的材料为钛合金, 主要检测对象是表面或穿透性疲劳裂纹, 因此, 拟采用较高的频率。此外对于透入深度来说, 频率愈低透入深度愈大。但降低频率的同时检测灵敏度也随之下降, 检测进度也可能降低。因此, 在正常的情况下, 检测频率要选得尽可能高, 只要在此频率下仍具有必要的透入深度即可。若只是需要检测工件表面裂纹, 则可采用高到几 MHz 的频率。若需检测埋藏于一定深度处的皮下缺陷, 则必须牺牲灵敏度而采用非常低的频率, 这时候它不可能检测出细小的缺陷。综合各种因素, 最终选择检测频率为 5.2 MHz。

### 4 检测仪器选择

由于压气机 2 级叶片的探伤工作在飞机上进行, 探伤空间狭小, 必须选用便携式的涡流探伤仪器。笔者选用的是 MET-1 型智能掌上型涡流探伤仪。该仪器独特的人体工学设计可以实现单手掌握, 用拇指操作仪器所有功能键, 而另外一只手则可以腾出, 用于移动探头检测试样, 方便探伤人员操作。该仪器检测灵敏度高、检测可靠、操作简单、检测结果可以保存和打印, 可为探伤分析提供可靠的依据; 为了方便工作人员的操作和直观地显示探伤的过程与结果, 软件部分设计了美观、简洁、交互性好的操作界面, 该仪器适合外场涡流探伤使用。

### 5 涡流传感器设计

涡流传感器在检测时需满足的主要性能一是检测灵敏度, 二是有效地消除干扰信号。另外, 在外形设计上要考虑传感器对检测面的可达性。因此根据 2 级压气机叶片的结构特点, 笔者设计了如图 1 所示传感器。

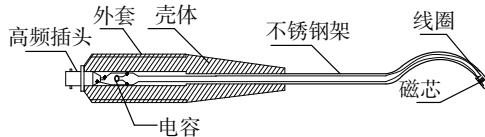


图 1 传感器结构

为了提高检测灵敏度, 在传感器线圈中插入磁芯使磁场聚焦。所以, 制作时按线圈的几何尺寸把线圈绕在磁芯上, 将线圈的引出线焊在接线柱上, 然后装入传感器壳体, 用环氧树脂胶封装。实际绕制线圈时, 对于含有磁芯的放置式传感器线圈匝数可由下式估算<sup>[3]</sup>:

$$L = \frac{\mu_s N^2 D_0^2}{50 \left( D_0 + 2l + 1.36 \frac{l}{D_0} \right)} \quad (3)$$

式中  $L$  为电感量,  $\mu\text{H}$ ;  $\mu_s$  为磁芯的有效磁导率;  $N$  为线圈匝数;  $l$  为线圈长度;  $D_0$  为线圈平均半径。由此得出传感器参数为线圈匝数 36 匝, 线圈内半径 2.0 mm, 线圈外半径 3.5 mm, 线圈电感 3 mH, 线圈电阻 10  $\Omega$ , 绕制铜线直径 0.15 mm, 磁芯材料为锰钢, 磁芯直径 2.0 mm。

### 6 航空构件检测试验

如图 2 所示的 2 级压气机叶片的叶尖部位有一疲劳裂纹缺陷。该叶片材料为钛合金; 叶尖中部裂纹长 8 mm, 宽 0.1 mm; 涡流激励频率为 5.2 MHz; 传感器为自制屏蔽弯角传感器。

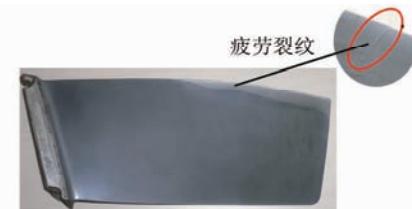


图 2 某型发动机 2 级压气机叶片

检测前应用抹布将待测部位擦洗干净, 检测时探头应尽量与被检面保持垂直, 探头扫查速度一般保持在 20 mm/s 左右, 行距 6 mm 左右, 随时观察

## 2011 年 ASNT 2 级培训考试通知(中文试卷)

随着我国对外贸易经济的不断发展,无损检测人员海外资格证书的需求量日益增大。中国机械工程学会无损检测分会(对外称中国无损检测学会 ChSNDT)于 2007 年 12 月与美国无损检测学会(ASNT)商定:鉴于中国有许多中小企业不具备取得美国学会 3 级证书的条件,因而不可能做到由本企业的 ASNT 3 级人员培训认证本企业的 2 级人员,故由中国机械工程学会无损检测分会牵头与国内资深的 ASNT 3 级人员合作,在同一行业范围内招生培训认证 ASNT 2 级人员。其认证结果可在学会网站上查询 [www.chsndt.com](http://www.chsndt.com)。中国机械工程学会无损检测分会决定按照 SNT-TC-1 和 CP189 标准举办 ASNT 2 级人员培训取证班。每学员一次只能报考 2 个方法。

**报考条件:**学员必须是相关行业 2 级证书或以上持有者。

**递交材料:**申请表(每方法 1 张),雇主委托书,2 级证书复印件,身份证件复印件,学历证明复印件,1 寸或 2 寸近照 2 张/每方法

### 上半年培训考试日期:

- 5 月 26 日 报到
- 5 月 27 日 ASNT 标准和工艺
- 5 月 28—29 日 UT 培训复习
- 5 月 30—31 日 RT 培训复习

屏幕,注意突变信号。

在扫查中,如有信号进入报警框,并且该信号重复性良好,则可判别为缺陷信号,并进一步扫查以具体确定缺陷在工件中的部位和范围。图 3 所示为缺陷阻抗图。

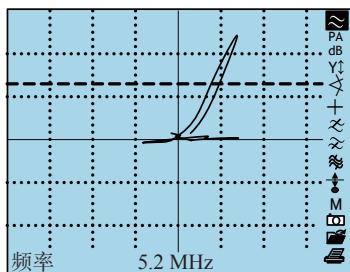


图 3 检测阻抗图

5 月 30—31 日 MT,PT 培训复习

6 月 1 日 RT,UT,MT,PT 实际操作

6 月 2 日 RT,UT,MT,PT 考试

### 下半年培训考试日期:

- 11 月 3 日 报到
- 11 月 4 日 ASNT 标准和工艺
- 11 月 5—6 日 UT 培训复习
- 11 月 7—8 日 RT 培训复习
- 11 月 7—8 日 MT,PT 培训复习
- 11 月 9 日 RT,UT,MT,PT 实际操作
- 11 月 10 日 RT,UT,MT,PT 考试

**费用:**UT,RT 2800 元/方法;MT,PT 2500 元/方法(含培训教材、标准、培训费、考试费、证书费)。若同时报考 2 个方法,第二个方法减 300 元。

**注:**因学员已持有国内相关行业 2 级证书或以上,本培训仅为充实 ASNT 的标准和法规,复习和加深 2 级无损检测知识,故培训时间较短。

学员的食宿费自理,学会秘书处可提供就近的食宿信息。

地址:上海市辉河路 100 号 6 楼;联系人:朱亚青(13601691591),王莹赟(13817155883);邮编:200437;电话/传真:021-65550277;E-mail: chsndt@sh163.net; chsndt2008@163.com。

(中国机械工程学会无损检测分会)

## 7 结语

采用涡流探伤方法检测某型发动机 2 级压气机叶片。在检测频率选择和传感器设计中,充分考虑了航空维修的特点和被检件的特点。利用该探伤方法,对某机场某型发动机 1272 片二级压气机叶片探伤普查,发现两片叶片在叶尖部位存在疲劳裂纹,有效地排除了安全隐患。

### 参考文献:

- [1] 陶旺斌,周在杞. 电磁检测[M]. 北京:航空工业出版社,1995:152—166.
- [2] 孙金立,陈新波. 放置式探头检测工件时特征频率的计算[J]. 无损检测,2001,23(5):185—189.
- [3] 任吉林,林俊明. 电磁检测[M]. 北京:机械工业出版社,2000:57—79.