



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 104458911 B

(45)授权公告日 2017.01.25

(21)申请号 201410779635.6

CN 102721741 A, 2012.10.10,

(22)申请日 2014.12.16

CN 202533409 U, 2012.11.14,

(65)同一申请的已公布的文献号

CN 103969331 A, 2014.08.06,

申请公布号 CN 104458911 A

R. K. Chapman. A System Model for the Ultrasonic Inspection of Smooth Planar Cracks.《Journal of Nondesmtctive Evahtation》.1990,第9卷(第2/3期),第197-210页.

(43)申请公布日 2015.03.25

(73)专利权人 中国科学院工程热物理研究所

地址 100190 北京市海淀区北四环西路11号A202

田武刚.航空发动机关键构件内窥涡流集成化原位无损检测技术研究.《中国博士学位论文全文数据库 工程科技II辑》.2011,全文.

(72)发明人 李苏威 石可重

(51)Int.Cl.

G01N 29/04(2006.01)

审查员 余莲莲

(56)对比文件

CN 103048098 A, 2013.04.17,

JP 3442057 B2, 2003.09.02,

CN 103901109 A, 2014.07.02,

权利要求书1页 说明书4页 附图1页

(54)发明名称

一种风力机叶片超声检测的缺陷种类判定方法

(57)摘要

本发明公开了一种风电叶片超声波无损检测中对缺陷类型进行判断的方法。该方法采用超声波探伤技术对风力机叶片进行检测,通过所建立的缺陷物理模型与实际叶片缺陷中声强反射系数的比对,实现判定实际缺陷的种类。该方法由以下几部分组成:叶片典型缺陷分析,缺陷物理模型的建立,物理模型声强反射系数计算,实际叶片缺陷声强反射系数计算,实际叶片缺陷种类确定。

1.一种风力机叶片超声检测的缺陷种类判定方法,其特征在于,该方法包括分析叶片典型缺陷、建立叶片典型缺陷物理模型、计算叶片典型缺陷物理模型声强反射系数、实际测试并计算实际叶片缺陷声强反射系数和确定实际叶片缺陷种类,具体步骤如下:

1)分析叶片典型缺陷,本方法适用于如下几种典型缺陷:分层、气孔、夹杂或结构胶缺陷,以上几种缺陷中均出现了声阻抗差异较大介质的界面,如所待测的叶片缺陷可能属于上述缺陷类型,可采用该方法进行检测与评定;

2)简化物理模型,对于上述几种叶片缺陷中分层、气孔、结构胶缺陷,可简化为玻璃钢复合材料-空气物理模型;对于夹杂缺陷,可简化为玻璃钢复合材料-杂质物理模型;

3)计算物理模型声强反射系数,根据不同材料的声阻抗,通过公式 $R = I_r / I_o = (P_r / P_o)^2 = \left( \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2$ 计算步骤2)中所建立的两物理模型中玻璃钢复合材料与空气界面、玻璃钢复合材料与杂质界面的声强反射系数,其中 $I_o$ 指入射波声强, $I_r$ 指反射波声强, $Z_1$ 指声波传出材料的声阻抗, $Z_2$ 指声波传入材料的声阻抗, $P_o$ 指入射波声压, $P_r$ 指反射波声压;

4)实际测试并计算实际缺陷声强反射系数,对实际待测叶片进行超声测量,并计算出缺陷界面的声强反射系数,具体过程如下:

以1号位置代表发现缺陷的位置,2号位置代表没有缺陷的位置,o-1代表缺陷位置缺陷界面的入射波,r-1代表缺陷界面反射波;o-2代表无缺陷位置底面玻璃钢与空气界面的入射波,r-2代表玻璃钢-空气界面反射波;

通过检测设备获得缺陷界面反射波r-1和无缺陷位置底面玻璃钢-空气界面反射波r-2的波高,通过已知的无缺陷位置底面玻璃钢与空气界面反射波r-2的波高推导出缺陷界面入射波o-1的波高:①将玻璃钢与空气界面反射波r-2波高通过步骤3)中玻璃钢复合材料-空气物理模型的反射系数,推导出玻璃钢与空气界面入射波o-2的波高;②通过对不同厚度同材质的玻璃钢进行测试,记录不同厚度反射信号的分贝值,得到材料衰减曲线和缺陷深度与地面深度之间的衰减分贝值;③将玻璃钢与空气界面入射波o-2的波高利用衰减分贝值推导出缺陷界面入射波o-1的波高;

在得知缺陷界面反射波r-1的波高和缺陷界面入射波o-1的波高后,计算出实际缺陷界面的声强反射系数;

5)确定缺陷种类,将步骤4)中所获得的实际缺陷界面的声强反射系数与步骤3)中物理模型声强反射系数进行对比,确定出实际缺陷所对应的相应物理模型,并结合出现缺陷的位置和规模,判断实际缺陷的具体种类。

2.根据权利要求1所述的方法,其特征在于,该方法针对风力机叶片分层、气孔、夹杂或结构胶缺陷出现声阻抗差异较大介质界面的缺陷。

3.根据权利要求1所述的方法,其特征在于,需要计算两种缺陷物理模型界面的声强反射系数。

4.根据权利要求1所述的方法,其特征在于,需要根据实际缺陷回波的屏幕波高和底面回波的屏幕波高,推导出实际界面的声强反射系数。

5.根据权利要求1所述的方法,其特征在于,在推导实际界面声强反射系数时,需要考虑到衰减影响。

## 一种风力机叶片超声检测的缺陷种类判定方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及机械行业风力发电技术领域,尤其涉及一种风力机叶片超声检测的缺陷种类判定方法。

### 背景技术

[0002] 风能是一种重要的可再生能源,我国仍处在风力发电高速发展的时期。风力发电机的寿命和安全性影响着风电利用和发展的脚步,是风能利用能否健康快速发展的重要因素。风电叶片作为风力发电机基础和关键的部件,其寿命和安全性直接影响着整个风电机组的寿命和安全状况。在风电叶片生产、运行的过程中,可能会因为生产工艺和运行工况导致叶片内部复合材料和结构产生损伤。损伤的存在会在叶片运行过程中复杂交变载荷的影响下进一步扩展,造成局部薄弱区,并最终降低叶片的寿命和运行安全性。为使风电叶片的寿命和安全性得到保障,有必要对其开展损伤和故障的诊断。这些风电叶片内部的缺陷是无法通过常规质检、日常维护被发现出来。无损检测是一种不破坏物体结构,发现物体内部缺陷损伤的检测手段,可以尝试应用于风电叶片中对其内部损伤进行探寻,以保障风电叶片乃至整个风电机组的安全运行及使用寿命。超声波无损检测具备穿透能力较大,对平面型缺陷探伤灵敏度较高,可较为准确地测定缺陷的深度和大小,设备轻便,操作安全,易于实现自动化检验等优点。但由于不同种类的缺陷对风力机叶片性能的影响程度不同,通过超声波无损检测直接获取的信号,无法对叶片内部缺陷种类进行识别,这将有碍于对风力机叶片质量的评估和对生产工艺过程的反馈。建立一套应用于风电叶片超声波检测的缺陷种类判别方法,是开展风电叶片超声检测的重要保障。

[0003] 本专利所提供的方法,基于对风电叶片典型缺陷进行分析,建立缺陷损伤的物理模型,通过实测叶片与物理模型中声强反射系数的对比,确定缺陷对应的物理模型,并结合缺陷出现的位置和规模判定缺陷种类。

### 发明内容

[0004] (一)要解决的技术问题

[0005] 针对风力机叶片超声无损检测中,在得到缺陷超声信号的前提下,无法通过直观的超声反射信号图像确定缺陷种类的问题,需要有一种评估方法,对超声反射波信号进行评判,确认具体的缺陷种类。

[0006] (二)技术方案

[0007] 本发明提供了一种利用超声波声强反射系数对比的方法,能够有效地对风力机叶片缺陷种类进行判定。其特征在于,该方法由以下几部分组成:分析典型缺陷;简化物理模型;计算物理模型声强反射系数;计算实际缺陷声强反射系数;确定缺陷种类。具体步骤如下:

[0008] 1)分析典型缺陷。本方法适用于如下几种典型缺陷:分层、气孔、夹杂、结构胶缺胶等缺陷。以上几种缺陷中均出现了声阻抗差异较大介质的界面,如复合材料与空气或者复

合材料与杂质之间。如所待测的叶片缺陷可能属于上述缺陷类型,可采用该方法进行检测与评定。

[0009] 2)简化物理模型。对于上述几种叶片缺陷中分层、气孔、结构胶缺胶缺陷,可简化为玻璃钢复合材料-空气物理模型,模型如附图1所示;对于夹杂缺陷,可简化为玻璃钢复合材料-杂质物理模型,模型如附图2所示。

[0010] 3)计算物理模型声强反射系数。根据不同材料的声阻抗,通过公式  $R = I_r/I_o = (P_r/P_o)^2 = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}\right)^2$  计算2)中所建立两种物理模型中玻璃钢复合材料与空气界面、玻璃钢复合材料与杂质界面的声强反射系数。式中  $I_o$  指入射波声强,  $I_r$  指反射波声强,  $Z_1$  指声波传出材料的声阻抗,  $Z_2$  指声波传入材料的声阻抗,  $P_o$  指入射波声压,  $P_r$  指反射波声压。

[0011] 4)实际测试并计算实际缺陷声强反射系数。对实际待测叶片进行超声测量,并计算出缺陷界面的声强反射系数。其实现的原理与过程如下:

[0012] 在实际测试中,只能通过检测设备的显示屏看到反射回波的波形图像,需要利用实际缺陷回波的屏幕波高和底面回波波高,推导出实际缺陷界面的声强反射系数。实际测试的分析原理如附图3所示,1号位置为发现缺陷的位置,2号位置是没有缺陷的位置。 $o-1$  为缺陷位置缺陷界面的入射波,在缺陷界面一部分变为缺陷界面反射波  $r-1$ ,另一部分变为缺陷界面透射波  $t-1$ ;  $o-2$  为无缺陷位置底面玻璃钢与空气界面的入射波,在玻璃钢-空气界面一部分变为反射波  $r-2$ ,另一部分变为透射波  $t-2$ 。上述各波中只有缺陷界面反射波  $r-1$  和玻璃钢-空气界面反射波  $r-2$  可以通过显示屏看到波形,而实际缺陷界面的声强反射系数是通过缺陷界面反射波  $r-1$  的波高与缺陷界面入射波  $o-1$  的波高进行计算的,这就需要通过已知的玻璃钢与空气界面反射波  $r-2$  的波高推导出缺陷界面入射波  $o-1$  的波高。以下为推导的过程:①将玻璃钢与空气界面反射波  $r-2$  波高通过步骤3)中玻璃钢复合材料-空气物理模型的反射系数,推导出玻璃钢与空气界面入射波  $o-2$  的波高;②通过对不同厚度同材质的玻璃钢进行测试,记录不同厚度反射信号的分贝值,得到材料衰减曲线和缺陷深度与地面深度之间的衰减分贝值;③将玻璃钢与空气界面入射波  $o-2$  的波高利用衰减分贝值推导出缺陷界面入射波  $o-1$  的波高。在得知缺陷界面反射波  $r-1$  的波高和缺陷界面入射波  $o-1$  的波高后,计算出实际缺陷界面的声强反射系数。

[0013] 计算过程如下:

[0014] 在一定增益条件下,底面回波的屏幕高度为  $H_{r-2}$ ;在同样增益条件下,缺陷回波的屏幕高度为  $H_{r-1}$ 。将底面回波高度  $H_{r-2}$ ,根据玻璃钢复合材料-空气物理模型中反射波的声强反射系数 0.998 得到在底面的入射波屏幕波高为  $H_{o-2}$ 。通过该材料的衰减曲线,得到自缺陷深度至底面深度的衰减分贝数,由分贝数与声压及波高的关系分贝数 =  $20 \lg P_1/P_2 = 20 \lg H_1/H_2$ ,得到缺陷深度下入射波屏幕波高  $H_{o-1}$ ,即可通过公式  $R = (H_{r-1}/H_{o-1})^2$  计算出实际缺陷界面的声强反射系数。

[0015] 5)确定缺陷种类。将4)中所获得的实际缺陷界面的声强反射系数与3)中物理模型声强反射系数进行对比,确定出实际缺陷所对应的相应物理模型,并结合根据出现缺陷的位置和规模判断实际缺陷的具体种类。如果出现在玻璃钢层中,尺寸较大且连续,则为分层损伤;如果出现在玻璃钢层中,缺陷集中,尺寸较小且不连续,则为气泡损伤;如果出现在玻璃钢层以外,则判断为结构胶缺胶损伤。

[0016] (三)有益效果

[0017] 本发明填补了针对风力机叶片缺陷种类判定的空白,具有如下明显的优点:

[0018] 1)能够有效对风力机叶片内部典型缺陷的种类进行判定。

[0019] 2)可以推广到其它复合材料结构设备中,对缺陷种类进行判定。

### 附图说明

[0020] 图1为玻璃钢复合材料-空气物理模型示意图;

[0021] 图2为玻璃钢复合材料-杂质物理模型示意图;

[0022] 图3为实际测试的分析原理示意图。

### 具体实施方式

[0023] 为使本发明的目的、技术方案和优点更加清楚明白,以下结合具体实施例,对本发明进一步详细说明。

[0024] 本实施例对象为某MW级风力机叶片,对该叶片已发现的一处缺陷进行缺陷种类判定的步骤如下:

[0025] 1)叶片中可以通过超声波检测方法明显检测出来的缺陷包括分层、气孔、夹杂、结构胶缺胶等缺陷。这些缺陷中均出现了声阻抗差异较大介质的界面,如复合材料与空气或者复合材料与杂质之间。

[0026] 2)将上述几种叶片缺陷简化为玻璃钢复合材料-空气、玻璃钢复合材料-杂质两种物理模型,如图1、2所示。

[0027] 3)根据不同材料的声阻抗,通过公式  $R = I_r / I_o = (P_r / P_o)^2 = \left( \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2$  计算上述两

种物理模型中玻璃钢复合材料与空气界面、玻璃钢复合材料与杂质界面的声强反射系数。由于在风电叶片生产过程中,聚四氟乙烯是最有可能作为夹杂的物质杂质,所以以聚四氟乙烯进行计算。超声波自玻璃钢复合材料至空气的声强反射系数  $R = 0.998$ ,超声波自玻璃钢复合材料至聚四氟乙烯的声强反射系数  $R = 0.084$ 。

[0028] 4)实际检测时,如图3所示,该叶片测到缺陷位置的部位厚度为20mm,在15mm位置处存在未知缺陷。在51.5dB增益条件下,20mm处的底面回波高度  $H_{r-20}$  是58%的屏幕高度;在51.5dB增益条件下,缺陷回波高度  $H_{r-15}$  是86%的屏幕高度。将20mm处的底面回波高度  $H_{r-20}$ ,根据玻璃钢复合材料-空气物理模型中反射波的声强反射系数0.998得到在20mm深度下的入射波屏幕波高  $H_{o-20}$  为58%屏幕波高。通过该材料的衰减曲线,自15mm至20mm衰减的分贝数为3.5dB,由分贝数与声压及波高的关系分贝数  $= 20 \lg P_1 / P_2 = 20 \lg H_1 / H_2$ ,得到对应15mm深度下入射波屏幕波高  $H_{o-15}$  为86.8%,即可通过公式  $R = (H_{r-15} / H_{o-15})^2$  计算出实际缺陷界面的声强反射系数为0.982。

[0029] 5)将实际缺陷界面的声强反射系数通过与物理模型声强反射系数进行对比,并考虑误差影响,确定实际缺陷对应的物理模型为玻璃钢复合材料-空气模型,该缺陷出现在玻璃钢层中,缺陷连续且尺寸较大约为30mm×40mm,则判定为分层损伤。

[0030] 以上所述的具体实施例,对本发明的目的、技术方案和有益效果进行了进一步详

细说明。所应理解的是,以上所述仅为本发明的具体实施例而已,并不用于限制本发明,凡在本发明的精神和原则之内,所做的任何修改、等同替换、改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

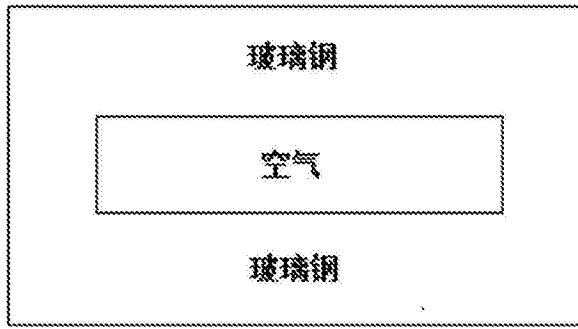


图1



图2

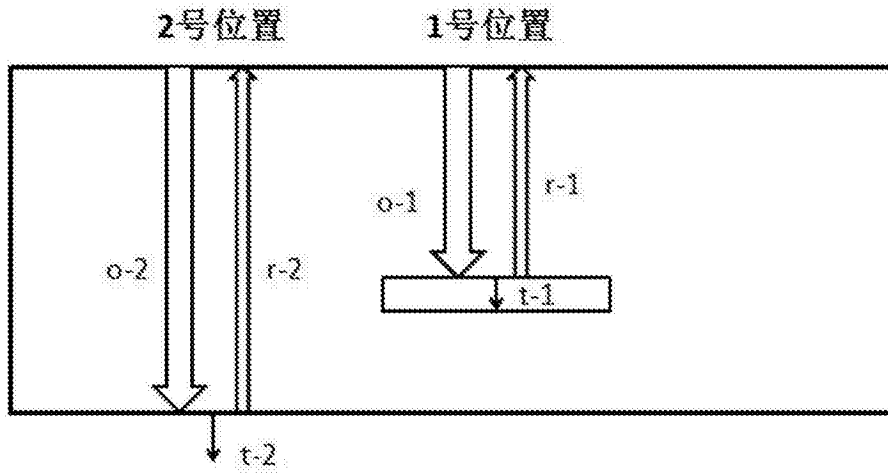


图3