

发动机叶片榫槽仿形涡流传感器的设计

廖泽彬, 张国才, 张 华

(北京理工大学珠海学院 数理与土木工程学院, 珠海 519085)

摘要: 针对特定的航空发动机涡轮叶片榫槽, 设计了同心方形线圈仿形涡流传感器, 在不同激励模式与激励频率下, 对发动机叶片榫槽开展电磁学仿真检测试验。仿真结果表明, 同心方形线圈传感器在激励频率为 500 kHz 与外线圈激励模式下, 除了半径为 0.05 mm, 深为 0.5 mm 的圆形缺陷无法检出外, 可以检测出长为 1.0 mm, 宽为 0.2 mm 或 0.1 mm, 深为 0.5 mm 或 1.0 mm 的 4 种纵向缺陷及半径为 0.1 mm, 深为 0.5 mm 或 1.0 mm 和半径为 0.05 mm, 深为 1.0 mm 的 3 种圆形缺陷。

关键词: 发动机叶片榫槽; 仿形涡流传感器; 电磁学仿真

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2022)07-0001-05

Design of the profiling eddy current sensor for the tongue and groove of the engine blade

LIAO Zebin, ZHANG Guocai, ZHANG Hua

(School of Applies Science and Civil Engineering, Beijing Institute of Technology(Zhuhai), Zhuhai 519085, China)

Abstract: In this paper, a concentric square coil profiling eddy current sensor is designed for a specific aero-engine turbine blade tongue and groove. Under different excitation modes and excitation frequencies, electromagnetic simulation tests are carried out on the engine blade tongue and groove. The simulation results show that under the excitation frequency of 500 kHz and the excitation mode of external coil, the concentric square coil sensor can detect four longitudinal defects with length of 1.0 mm, width of 0.2 mm or 0.1 mm, depth of 0.5 mm or 1.0 mm, and three circular defects with radius of 0.1 mm, depth of 0.5 mm or 1.0 mm, radius of 0.05 mm and depth of 1.0 mm. It was also found that the circular defects of radius of 0.05 mm with depth of 0.5 mm could not be detected.

Key words: engine blade tongue and groove; profiling eddy current sensor; electromagnetic simulation

涡扇发动机是飞行器热能与动能转换的重要结构, 而发动机叶片作为涡扇发动机的关键结构之一^[1], 在高温和极高的气动与负荷下工作, 并且受高温燃气造成的剧烈氧化反应以及热腐蚀的影响^[2-5]。榫槽为叶盘和叶片的连接处, 除了承受与叶片相当的负荷外, 还要承受额外的应力集中^[6-7], 榫槽一旦发生断裂, 叶片将面临脱落的危险, 因此对发动机叶片榫槽的检测是非常重要的^[8-11]。

收稿日期: 2021-12-15

作者简介: 廖泽彬(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为无损检测技术

通信作者: 张国才(1983—), 男, 讲师, 研究方向为电磁无损检测技术及其应用, 12031@bitzh.edu.cn

1 检测方法

1.1 基本原理

仿形涡流检测基于电磁现象, 依据麦克斯韦方程进行运算。使用 $\mathbf{A} - \phi$ 电磁有限元法, 基于对应的矢量磁位 \mathbf{A} 与标量电位 ϕ 对各种情况的电磁场进行求解, 分别得出导体域 Ω_c 与空气域 Ω_a 中准静态电磁场的控制方程^[12], 如式(1), (2)所示。

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} + \sigma \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla \phi \right) = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \times \frac{1}{\mu_0} \nabla \times \mathbf{A} = \mathbf{J}_s \quad (2)$$

式中: \mathbf{J}_s 为传导电流; μ_0 为真空磁导率; μ 为磁导率; σ 为电导率; t 为时间。

在 Maxwall 电磁学仿真模拟软件中对分析空间进行离散化拆分, 结合边界条件使用里兹或伽辽金加权余量法对式(1), (2)进行求解, 可得出矢量磁位 \mathbf{A} 与标量电位 ϕ 的空间情况。

$$\nabla \times \mathbf{A} = \mathbf{B} \quad (3)$$

$$\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \nabla \phi \quad (4)$$

结合式(3), (4)即可得出电场强度 \mathbf{E} 与磁感应强度 \mathbf{B} 在空间中的分布情况, 最后结合式(5)可得出仿形涡流检测线圈的感应电动势 ξ 为

$$\xi = -\frac{d}{dt} \left(\iint_s \nabla \times \mathbf{A} \cdot d\mathbf{S} \right) \quad (5)$$

式中: S 为被仿形线圈围绕的面积大小。

1.2 方案设计

同心方形线圈传感器设计方案参考张国才等^[13]对发动机叶片前缘的仿形涡流探头设计, 使传感器的线圈向内弯曲并达到与叶片榫槽底部相同的曲率, 以此尽可能增加同心方形线圈传感器与叶片榫槽内部的贴合度, 且检测时传感器的最低点距离榫槽内表面 0.2 mm, 可增强检测效果。

同心方形线圈传感器投影面为两个同心正方形, 外线圈投影面边长为 1.45 mm, 内线圈投影面边长为 0.72 mm。线圈材料为铜, 线半径为 0.1 mm, 其曲率半径与榫槽曲率半径相同, 为 0.97 mm。仿形传感器设计模型如图 1 所示。

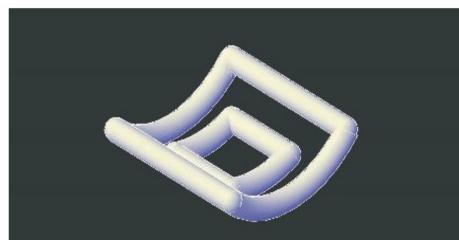


图 1 仿形传感器设计模型

为选择合适的激励模式, 设置多个检测频率进行仿真实验, 对比检测出的电信号, 以获得同心方形线圈传感器的最佳检测频率。激励电流安匝数参考张国才等对发动机叶片前缘时使用的安匝数(20 000 A·匝), 叶片榫槽材料的相对磁导率为 1.000 18, 电导率为 625 000 S·m⁻¹。

为研究缺陷的种类与缺陷在各个方向上的尺寸对检测效果的影响, 构建了纵向缺陷榫槽模型和圆形缺陷榫槽模型, 两种缺陷模型如图 2 所示。

纵向缺陷为沿榫槽延伸的长方形缺陷, 长为 1.0 mm, 宽为 0.2 mm 或 0.1 mm, 深为 0.5 mm 或

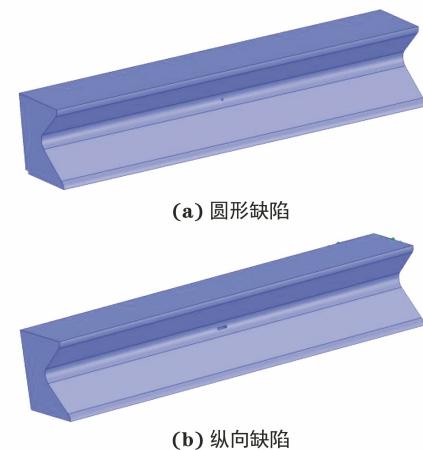


图 2 圆形缺陷和纵向缺陷榫槽模型

1.0 mm。圆形缺陷为垂直于榫槽的圆柱形缺陷, 半径为 0.1 mm 或 0.05 mm, 深为 0.5 mm 或 1.0 mm。两种缺陷的中心均位于长为 40.0 mm 的榫槽中间。检测时, 对缺陷两端各 10.0 mm 内的 37 个位置点进行了检测。

电磁场有限元分析需要对仿真对象进行有限元网格划分, 划分结果如图 3 所示。

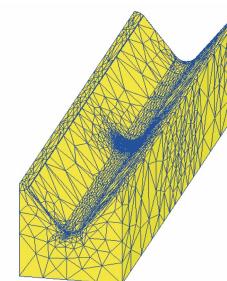


图 3 同心方形线圈传感器网格划分结果

2 试验分析

2.1 不同频率下纵向缺陷的检测效果对比

分别使用频率为 100, 200, 300, 400, 500, 600 kHz 的电流对外线圈进行激励, 检测 1.0 mm × 0.2 mm × 1.0 mm(长 × 宽 × 深)的纵向缺陷榫槽模型, 同时使用内线圈采集榫槽内 37 个点的磁场变化, 可得出对应的感应电压与相位信息。将采集到的感应电压和相位与无缺陷榫槽采集到的感应电压和相位相减(以下仿真实验采集点数及位置均相同), 分别得出相对感应电压相位(以下简称相位)、相对实部感应电压(以下简称实部电压)、相对虚部感应电压(以下简称虚部电压)和相对合成感应电压(以下简称合成电压)。不同频率下缺陷各位置相位与电压的分布如图 4~5 所示。

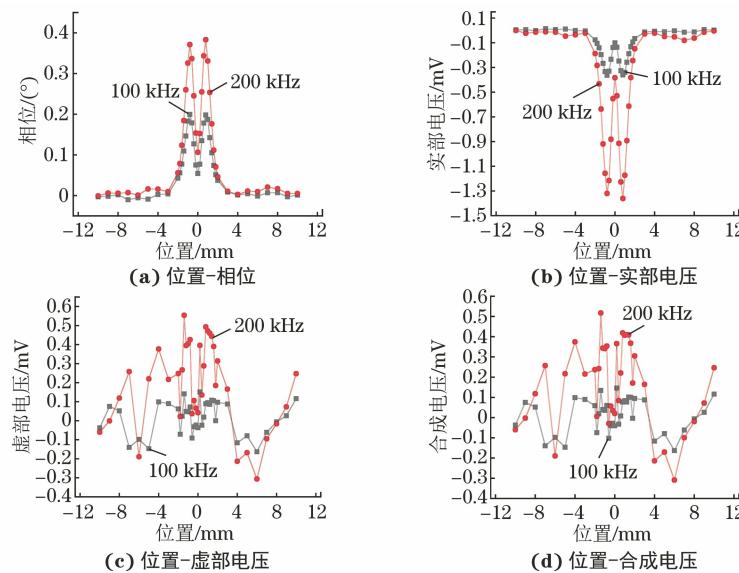


图 4 100 kHz 和 200 kHz 下缺陷各位置相位与电压的分布

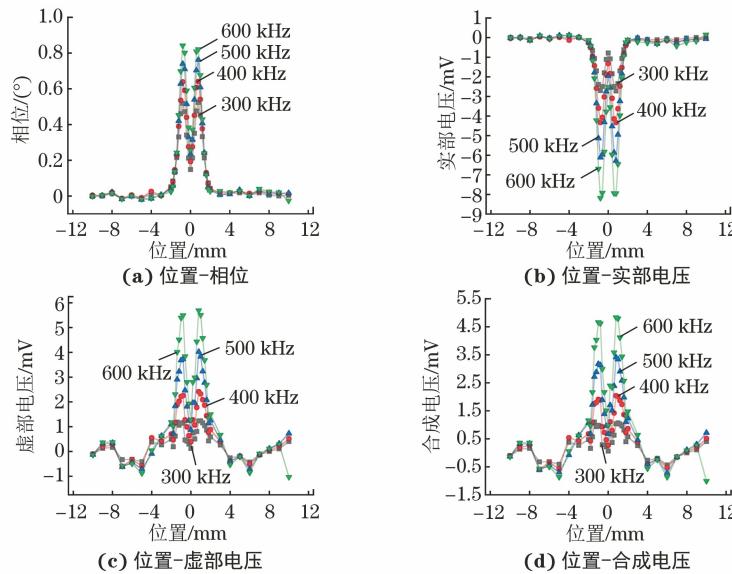


图 5 300,400,500,600 kHz 下缺陷各位置相位与电压的分布

由图 4 可见,当激励电流频率为 100 kHz 和 200 kHz 时,相位、实部电压与位置间存在明显的变化规律,虚部电压、合成电压与位置无明显变化规律。

由图 5 可见,当激励电流频率为 300,400,500,600 kHz 时,相位、实部电压、虚部电压和合成电压与位置间存在明显的变化规律。

结合得到的数据,决定使用规律最为明显的实部电压和相位作为表征检测效果的指标。不同频率下缺陷各位置实部电压与相位的分布如图 6 所示。

由图 6(a)可知,随着激励电流频率的增大,对应的感应实部电压变化幅值也增大,在 4.0 ~ 10.0 mm 位置,实部电压幅值变化极小,表明在此

区域内,无明显的涡流阻碍作用。中间实部电压极大值对应缺陷中心,且电压值小于两端无缺陷区域的电压值,表明缺陷处存在一定的涡流阻碍作用。实部电压最低点均出现在内线圈与纵向缺陷两端重合时的位置,此时纵向裂纹对涡流阻碍作用达到最大。

由图 6(b)可知,随着激励电流频率的增大,对应相位的幅值也增大,在 4.0 ~ 10.0 mm 位置,相位幅值变化极小,中间相位极小值对应缺陷中心,且相位大于两端无缺陷区域的相位,相位最高点均出现在内线圈与纵向缺陷两端重合的位置,符合实际设计。

上述检测结果说明,激励电流频率越大,实部电

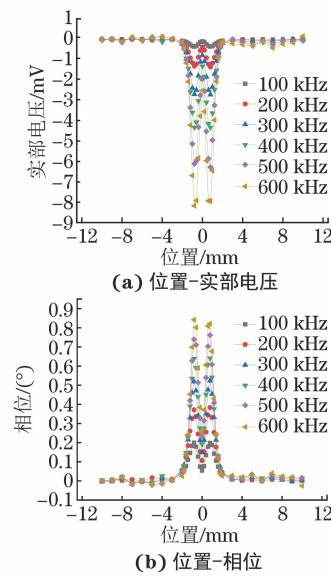


图 6 不同频率下缺陷各位置实部电压与相位的分布

压越高, 相位变化也越大, 故选取 500 kHz 作为同心方形线圈传感器接下来的仿真试验频率。

2.2 不同激励模式下纵向缺陷的检测效果对比

500 kHz 下, 内外激励模式得到缺陷各位置相位与实部电压的分布如图 7 所示。

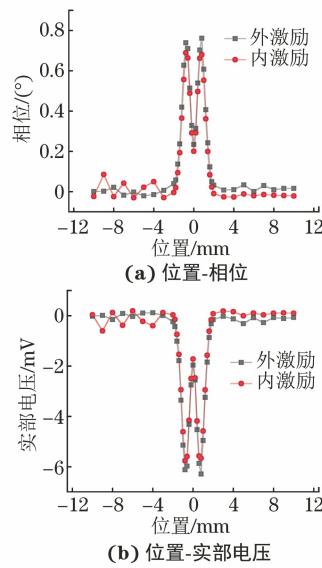
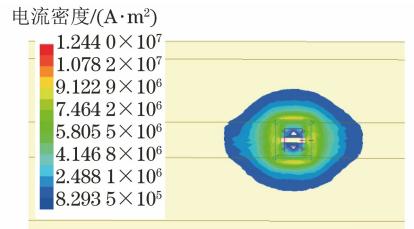


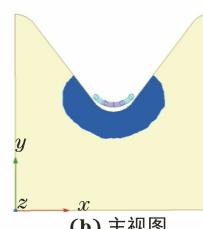
图 7 500 kHz 内外激励模式下缺陷各位置的相位与实部电压分布

由图 7 可知, 内外线圈激励所产生的相位与实部电压信号差异并不明显, 但在外线圈激励时, 实部电压幅值的最大值略高于内线圈激励时的电压最大幅值。500 kHz 下缺陷的涡流密度云图如图 8 所示。

由图 8 可知, 激励外线圈时, 其能覆盖较大面积的榫槽槽底, 因而选择外线圈激励作为后续同心方



(a) 俯视图



(b) 主视图

(c) 左视图

图 8 500 kHz 下缺陷的涡流密度云图

形线圈传感器的激励模式。

在 500 kHz、外线圈激励模式下, 对长为 1.0 mm, 宽为 0.2 mm 和 0.1 mm, 深为 0.5 mm 和 1.0 mm 等 4 种尺寸的纵向缺陷榫槽模型进行仿真试验。纵向缺陷榫槽模型的涡流仿真检测结果如图 9 所示。

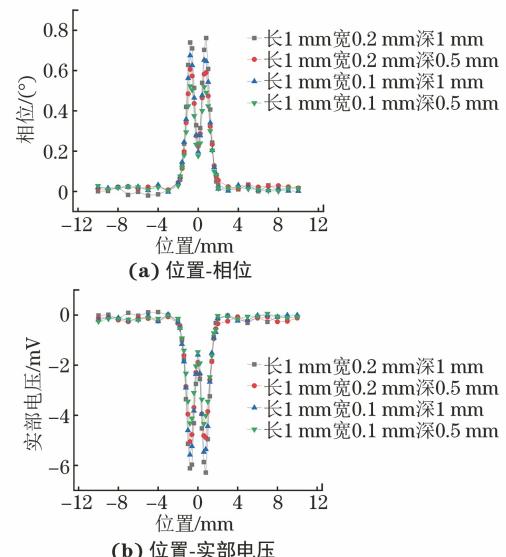


图 9 纵向缺陷榫槽模型的涡流仿真检测结果

由图 9(a)可知, 4 种纵向缺陷的中心极小值点坐标与两个极大值点坐标均接近, 中心极小值均出现在缺陷的中心点处, 且极大值点均位于内线圈与纵向缺陷的重合位置, 符合设计的位置距离关系。

由图 9(b)可知, 4 种纵向缺陷的两端均存在电压变化微小的区域, 该区域内的涡流特征与无缺陷时的涡流特征相当。中间电压极大值点均位于纵向缺陷中心位置, 且大小小于两端无缺陷区域的电压, 说明此时缺陷存在对涡流的阻碍作用; 两电压的极

小值均位于内线圈与纵向缺陷的重合位置, 说明此时纵向缺陷对涡流的阻碍作用达到最大; 纵向缺陷深度对电压幅值的影响大于宽度对电压幅值的影响。

在同样模式下对圆形缺陷榫槽模型进行仿真试验, 圆形缺陷榫槽模型的涡流仿真检测结果如图 10 所示。

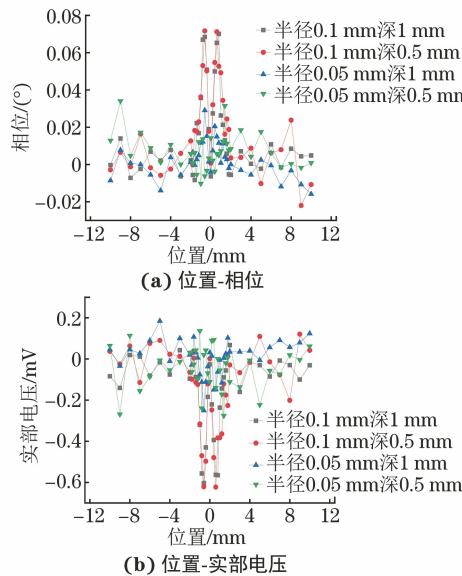


图 10 圆形缺陷榫槽模型的涡流仿真检测结果

由图 10(a)可知, 当圆形缺陷半径为 0.05 mm, 深为 0.5 mm 时, 相位随位置变化无明显规律; 当圆形缺陷半径为 0.05 mm, 深为 1.0 mm 与半径为 0.1 mm, 深为 1.0 mm 或 0.5 mm 时, 相位随位置的变化存在明显的规律, 缺陷的相位振幅极大值非常接近, 位置点接近圆形缺陷与内线圈重合处, 缺陷中心处的相位均为极小值。

由图 10(b)可知, 当圆形缺陷半径为 0.05 mm, 深为 0.5 mm 时, 电压随位置变化无明显规律, 说明同心方形线圈传感器无法检测该尺寸的圆形缺陷; 当圆形缺陷半径为 0.05 mm, 深为 1.0 mm 与半径为 0.1 mm, 深为 1.0 mm 或 0.5 mm 时, 电压随位置的变化存在明显规律, 缺陷的电压振幅极大值非常接近且位置点位于圆形缺陷与内线圈重合处, 缺陷中心处的相位均为极大值, 说明在这两个尺寸下, 缺陷对涡流存在明显的阻碍作用, 产生了明显的电压变化。

3 结语

在激励电流频率为 500 kHz, 外线圈激励模式下, 同心方形线圈传感器可检测纵向缺陷模型中长为 1.0 mm, 宽为 0.2 mm 或 0.1 mm, 深为 0.5 mm 或 1.0 mm 的 4 种纵向缺陷, 可以根据感应线圈所接收的相位信息与实部电压信息对缺陷进行定位与定量; 在对半径为 0.1 mm 或 0.05 mm, 深为 0.5 mm 或 1.0 mm 的圆形缺陷进行检测时, 除去半径为 0.05 mm, 深为 0.5 mm 的圆形缺陷无法检出外, 其余尺寸缺陷均可检测出, 也可以根据感应线圈所接收的相位信息与实部电压信息对缺陷进行定位与定量。

参考文献:

- [1] 王庆胜. 航空发动机涡轮叶片缺陷检测中的关键技术研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2005.
- [2] 刘滨春. 涡轮盘榫槽底裂纹损伤分析[J]. 工程与试验, 2008, 48(4): 27-29, 40.
- [3] 郑杨. 发动机榫头榫槽接触应力的有限元分析[J]. 现代工业经济和信息化, 2017, 7(15): 17-18.
- [4] 陈希, 王俊昌, 胡春玲. 航空发动机叶片榫头榫槽连接结构微动疲劳研究[J]. 科技风, 2018(22): 144-145.
- [5] 石剑, 吕健. 飞机发动机涡轮工作叶片榫头裂纹的原位涡流探伤[J]. 无损检测, 2008, 30(6): 383-384, 386.
- [6] 张丽, 吴兴锁. 航空发动机涡轮盘榫槽拉刀检测方法[J]. 测量技术, 2009, 29(4): 31-32.
- [7] 刘铁. 压气机轮盘叶片槽检测方法的改进[J]. 机械工程师, 2010(6): 124-125.
- [8] 谢小荣, 江涛, 杨小林. 飞机发动机叶片榫槽爬波原位检测[J]. 无损检测, 2012, 34(1): 31-33.
- [9] 江涛, 龚春英, 谢小荣. 飞机发动机叶片榫槽超声爬波检测探头设计[J]. 机电产品开发与创新, 2011, 24(3): 19-20, 6.
- [10] 薛倩. 飞机发动机叶片榫槽超声波检测探头设计[J]. 山东工业技术, 2015(18): 214.
- [11] 郑杨. 发动机榫头榫槽接触应力的有限元分析[J]. 现代工业经济和信息化, 2017, 7(15): 17-18.
- [12] 程军. 碳纤维复合材料的电磁涡流无损检测技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
- [13] 张国才, 谢小荣, 刘永钊, 等. 叶片前缘仿形涡流检测仿真与试验设计[J]. 航空学报, 2021, 42(2): 424678.