

DOI: 10.13382/j.jemi.B2307139

# 飞机多层金属铆接结构缺陷检测的 新型电涡流探头仿真设计\*

徐昊<sup>1</sup> 包俊<sup>1,2</sup> 黄国勇<sup>1,2</sup> 邓为权<sup>1,2</sup> 赵成俊<sup>1</sup>

(1. 昆明理工大学民航与航空学院 昆明 650500; 2. 云南省先进装备智能控制及应用国际联合实验室 昆明 650500)

**摘要:**飞机多层金属铆接结构随着飞机服役时间的增加,并伴随极端服役环境,有可能出现疲劳裂纹等缺陷,及时发现缺陷并获取缺陷深度、方向等信息对损伤评估与维修具有重要意义。然而,由于多层结构带来的缺陷隐蔽性,导致常规电涡流探头检测信号特征不明显,且常规电涡流探头对某些方向缺陷不敏感,难以判断疲劳裂纹走向。针对上述问题,设计了一种十字跑道型差分式涡流探头,主要由一个十字跑道型激励线圈和两组差分检测线圈组成。通过建立飞机多层金属铆接结构缺陷检测的三维有限元模型研究新型涡流探头的可行性,包括对探头的结构进行了优化,分别对缺陷的不同方向、埋深和提高高度进行了仿真计算。结果表明,新型探头能够有效检测埋深6 mm、尺寸为10 mm×1 mm×1 mm的深层缺陷,并且能够获取缺陷的方向信息。相较传统探头,设计探头具有非敏感方向不漏检、抗提离效应、分辨力高等优势,研究结果可对飞机多层金属铆接结构检测的电涡流探头设计提供一定的参考。

**关键词:** 多层金属; 铆接结构; 电涡流检测; 缺陷方向; 差分结构

**中图分类号:** V267<sup>+</sup>; TG115.28 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 580.6099

## Simulation design of a new eddy current probe for defect detection of aircraft multi-layer metal riveting structure

Xu Hao<sup>1</sup> Bao Jun<sup>1,2</sup> Huang Guoyong<sup>1,2</sup> Deng Wei-quan<sup>1,2</sup> Zhao Chengjun<sup>1</sup>

(1. Faculty of Civil Aviation and Aeronautics, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;

2. Yunnan International Joint Laboratory for Intelligent Control and Application of Advanced Equipment, Kunming 650500, China)

**Abstract:** With the increase of aircraft service time and the extreme service environment, fatigue cracks and other defects may occur in the multi-layer metal riveting structure of aircraft. It is of great significance for damage assessment and maintenance to find defects in time and obtain information such as defect depth and direction. However, due to the concealment of defects caused by multi-layer structure, the detection signal characteristics of conventional eddy current probes are indistinct, and conventional eddy current probes are not sensitive to defects in certain directions, making it difficult to determine the direction of fatigue cracks. To address these problems, a cross-runway-type differential eddy current probe is designed, which is mainly composed of a cross-runway-type excitation coil and two sets of differential detection coils. The feasibility of the new eddy current probe is investigated by establishing a three-dimensional finite element model for defect detection of aircraft multi-layer metal riveting structures, including the optimization of the structure of the probe, and simulations are conducted to analyze the different directions of defects, the buried depths and the lift-off heights, respectively. The results indicate that the new probe can effectively detect deep defects with a buried depth of 6 mm and dimensions of 10 mm×1 mm×1 mm, and it can obtain the direction information of the defects. Compared to traditional probes, designed probes have advantages such as no missing defects in all directions, resistance to lift off effects, and high resolution. The research results can provide some reference for the design of eddy current probes for aircraft multi-layer metal riveting structure detection.

**Keywords:** multi-layer metal; riveting structure; eddy current testing; defect direction; differential structure

## 0 引言

多层金属铆接结构是常用的航空结构材料,因机械性能好、安全性高以及适应环境能力强等特点被广泛用于机身和机翼部分的连接与装配<sup>[1-2]</sup>。在飞机服役过程中,机身长期受到压力和张力的交变作用,使铆接孔周围产生较大的应力集中,容易产生疲劳裂纹,降低了飞机适航的安全性<sup>[3-4]</sup>。在航空维修领域,工程师主要根据裂纹方向与程度来预测扩展情况,并界定损伤容限,从而科学的制定飞机结构检修周期与策略<sup>[5]</sup>。因此,及时检测出飞机多层金属铆接结构的裂纹缺陷并获取关键缺陷信息,对预防飞机关键构件断裂等重大事故发生和更加科学、灵活的调整检查与维修策略具有重大的现实意义<sup>[6]</sup>。

当前,飞机的主要检测技术包括超声检测、磁粉检测、射线检测、渗透检测和涡流检测<sup>[7]</sup>5种无损检测技术。相比较其他几种检测技术,涡流检测技术因其不需超声检测时的耦合剂和磁粉检测时的磁化处理等特点,使其具有检测成本低、无接触检测、适应检测环境能力强以及操作简便等优点,在航空航天领域的无损检测、厚度测量等方面,涡流检测技术使用率已达50%<sup>[8]</sup>。

近年来,国内外学者针对飞机机体结构的电涡流检测开展了广泛的研究。宋凯等<sup>[9]</sup>针对飞机金属铆接结构采用远场涡流检测技术,通过三维模型仿真,分析了屏蔽阻尼材料和结构以及探头布置对检测效果的影响;张程杰等<sup>[10]</sup>基于TMR传感器设计了多通道差分激励涡流检测探头,实现了对飞机钛合金板件3 mm深层裂纹缺陷的检测。刘正帅等<sup>[11]</sup>设计了一种漏斗形磁芯探头,其在金属构件裂纹、腐蚀缺陷检测中具有较高的灵敏度;朱玉龙等<sup>[12]</sup>开发了一种旋转涡流检测探头,可用于飞机涡轮叶片气膜孔边裂纹的无损检测;Song等<sup>[13]</sup>针对飞机高锁螺栓紧固件缺陷检测,研发了一种放置式阵列远场涡流传感器,通过优化检测线圈中心与螺栓中心放置距离,以达到对紧固件孔边隐藏缺陷检测的最佳灵敏度;Sun等<sup>[14]</sup>提出了一种平行四边形线圈阵列的新型涡流传感薄膜,能够在更少的传感层和线圈数量对飞机螺栓孔边裂纹的径向长度和轴向深度进行定量分析与监测;Chen等<sup>[15]</sup>针对飞机不同导电率材料的缺陷检测提出了一种自变频电涡流检测方法,同时具有电流和频率两种检测信号,扩大了检测频率范围并提高了检测灵敏度;Wang等<sup>[16]</sup>设计了一种平面远场涡流聚焦探头用于检测飞机铆接构件隐藏缺陷,优化激励线圈倾角后具有更好的检测能力;Liao等<sup>[17]</sup>针对飞机蒙皮缺陷检测设计了一种N型探头,通过其 $B_x$ 和 $B_z$ 信号分别表征缺陷的深度和长度信息。目前关于飞机机体结构的涡流无损检测已取得很多成果,通过使用合适结构的探头并进行优化后,能够

对一定埋深的缺陷进行有效检测和识别。然而由于飞机多层金属铆接结构的复杂性,以及缺陷的隐蔽性,现有的探头对深层隐蔽缺陷还存在检测信号特征不明显、对某些方向缺陷不敏感、不能对裂纹缺陷方向信息进行判断的问题。因此,在现有研究基础上,考虑实际应用场景和检测需求,仍需要一种检测面积大、能有效检测出埋深缺陷以及获取裂纹方向的涡流检测探头,以满足对飞机无损检测的要求。

针对上述问题,本文设计了一种十字跑道型差分式新型涡流探头,并建立了飞机多层金属铆接结构缺陷检测的三维有限元模型进行探头的优化与模拟。十字跑道型激励线圈有效的增大了涡流有效聚集区域并使探头结构完整紧凑,扩大了扫查范围。通过对两组差分式检测线圈检测信号的处理分析,能够有效获取缺陷的方向信息和对不同埋深缺陷进行有效检测。与传统探头对比,设计的探头对多层金属铆接结构不同方向的裂纹不会发生漏检,且有更好的提高效应抑制效果。该研究结果对于飞机多层金属铆接结构缺陷的涡流检测与探头设计优化具有一定的指导意义。

## 1 检测原理

### 1.1 涡流检测原理

涡流检测是一种基于电磁感应原理的无损检测技术。如图1所示,将激励线圈放置于被测试件上方并通有交变电流时,会产生交变的激励磁场,并作用于被测试件,感应出涡流。感生的电涡流产生一个与激励磁场相反的涡流场,由检测线圈接收两个磁场所产生的和磁通量。

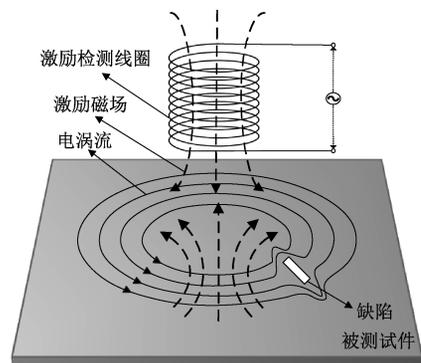


图1 电涡流检测技术原理

Fig. 1 The principle of eddy current testing technology

根据毕奥-萨伐尔定律,感应磁场强度与电流大小成正比则有:

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \times \frac{Idl \times \mathbf{r}}{r^2} \quad (1)$$

式中： $\mu_0$  为真空磁导率； $I$  为线圈电流， $r$  为电流源点与观测点间的距离。当缺陷出现时会导致涡流畸变，从而引发磁场波动，缺陷附近的涡流密度越大，其附近磁场变化越明显。因此电涡流探头应使表面涡流覆盖较广。

进一步，式 (2) 为电涡流密度公式，表明了线圈结构、被测试件电磁性质与电涡流密度的关系为：

$$J = \frac{\mu_0 N I f \sigma}{2R} \int_0^R [r \int_0^{2\pi} A_1 d\theta] dq] dr \quad (2)$$

$$A_1 = \frac{a^2 - \arccos\theta}{\{(r^2 + a^2 - 2\arccos\theta) + [z - (h + qL)]\}^2}^{3/2} \quad (3)$$

式中： $\mu_0$  为真空磁导率， $N$  为线圈匝数， $I$  为电流有效值， $f$  为激励频率， $\sigma$  为试件的电导率， $R$  为电流线半径， $z$  为试件内深度， $h$  为提高高度， $L$  为线圈长度。

可知，当被测试件存在缺陷、腐蚀，导致电导率发生变化时，涡流密度、磁场将随之改变，并反映为接收线圈上电压变化<sup>[18]</sup>。因此探头可通过检测电压变化作为评估缺陷的依据。

### 1.2 差分涡流探头探伤原理

传统差分涡流探头通常由 3 个圆形线圈依次排列组成，中间线圈为激励线圈，两侧检测线圈构成一组差分线圈，如图 2 所示。

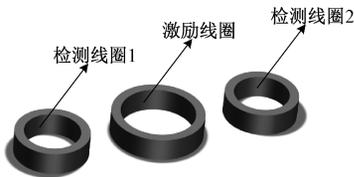


图 2 传统差分涡流探头

Fig. 2 Traditional differential eddy current probe

探伤过程中，当试件中不存在缺陷时，激励产生的电涡流对称，两侧的检测线圈感应出幅值相同、相位相反的电压，差分输出信号为 0；试件中存在缺陷时，原有涡流分布规律被破坏，两侧的检测线圈的感应电压不同，由此差分线圈会输出对应于缺陷的差分信号。因此，差分结构接收信号的相互抵消能够有效抑制噪声、机器振动等导致的干扰，增强对缺陷的探伤能力和提高检测的灵敏度<sup>[19-21]</sup>。

## 2 探头设计及有限元模型建立

### 2.1 探头结构设计

结合前文的分析，根据对飞机多层金属铆接结构缺陷检测的要求和特点，需要提高探头检测覆盖范围，提升检测过程中的抗干扰能力以及实现对缺陷方向的识别，

因此设计了一种十字跑道型差分式涡流探头。该探头的整体结构包括一个十字跑道型激励线圈和 4 个圆形检测线圈，如图 3、4 所示。

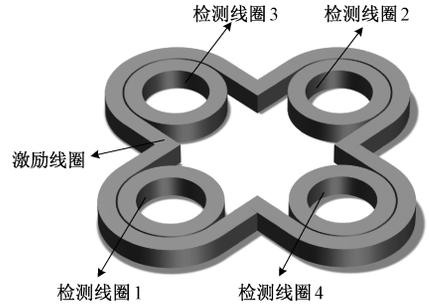


图 3 十字跑道型差分式涡流探头

Fig. 3 Cross-runway-type differential eddy current probe

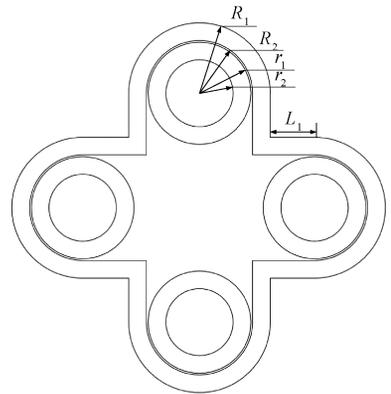


图 4 十字跑道型差分式涡流探头俯视图

Fig. 4 Cross-runway-type differential eddy current probe top view

其中十字跑道型激励线圈由 4 个半径相同的半圆和 8 条直道环绕而成；差分式检测线圈由 4 个半径相同的圆形线圈组成，检测线圈 1、2 和检测线圈 3、4 构成两组差分式线圈。由于探头各项性能指标与参数之间存在耦合、制约，本文采用控制变量法和仿真分析结合以确定相对更优的探头尺寸，探头设计参数如表 1 所示，其分析过程将在后续章节中详细讨论。

表 1 探头结构几何参数

Table 1 Geometric parameters of probe structure

参数名称	值
激励线圈外径 $R_1$ /mm	4
激励线圈内径 $R_2$ /mm	3
激励线圈直道 $L_1$ /mm	2.5
激励线圈高度/mm	2
激励线圈匝数	250
检测线圈外径 $r_1$ /mm	2.9
检测线圈内径 $r_2$ /mm	1.9
检测线圈高度/mm	2
检测线圈匝数	200
漆包铜线半径/mm	0.15

最后,根据前述差分探头的原理,充分利用差动结构的抗干扰性与高灵敏性,将设计探头两组差分检测线圈电压分别作差后合并输出作为检测信号,如式(4)所示。

$$V = (V_{p2} - V_{p1}) + (V_{p4} - V_{p3}) \quad (4)$$

式中:  $V_{p1} \sim V_{p4}$  为检测线圈 1~4 的电压。

### 2.2 三维有限元仿真模型建立

本文使用 COMSOL Multiphysics 多物理场仿真软件建立了飞机多层金属铆接结构缺陷检测的三维有限元模型,以验证设计探头的性能效果,仿真模型主要由多层铝合金平板、沉头铆钉构成飞机多层金属铆接结构,使用图 3 设计的十字跑道型差分式涡流探头对其进行缺陷仿真检测。三维有限元检测的几何模型如图 5 所示。

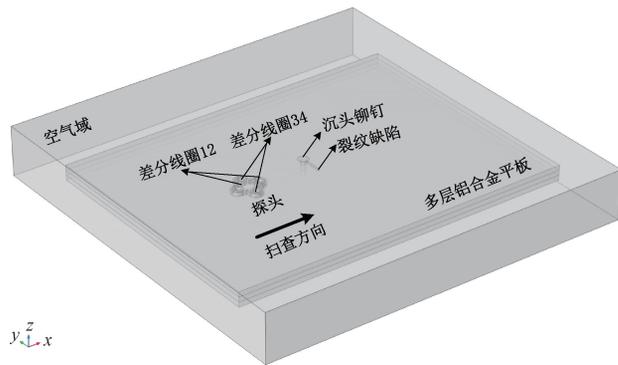


图 5 三维有限元检测几何模型图

Fig. 5 Three-dimensional finite element detection geometric model diagram

仿真模型中,结合实际情况,飞机多层金属铆接结构具体如图 6 所示,其中铝合金平板长宽厚尺寸为 200 mm×300 mm×3 mm,模拟 3 层总厚度为 9 mm 的多层铝合金结构,沉头铆钉半径 1.5 mm,钉头半径 3 mm,缺陷尺寸为 10 mm×1 mm×1 mm。

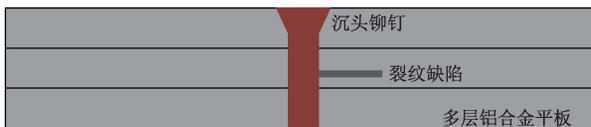


图 6 飞机多层金属铆接结构

Fig. 6 Aircraft multi-layer metal riveting structure

此外,三维有限元检测模型的空气域尺寸为 400 mm×400 mm×400 mm。检测模型材料物理性能参数如表 2 所示。

### 2.3 设计探头涡流密度与动态过程分析

通过三维有限元模型仿真计算,在探头提高 0.5 mm 时,得到设计探头、传统差分探头(图 2 所示)在多层铝

表 2 检测模型材料参数

Table 2 Inspection of model material parameters

材料	电导率/(S·m <sup>-1</sup> )	相对磁导率
2024T3 铝合金平板	1.876×10 <sup>7</sup>	1
沉头铆钉	1.876×10 <sup>7</sup>	1
铜	5.998×10 <sup>7</sup>	1
缺陷	10	1
空气	10	1

合金平板表面上的涡流分布,如图 7 所示。其中传统差分探头 3 个线圈尺寸和设计探头检测线圈一致。

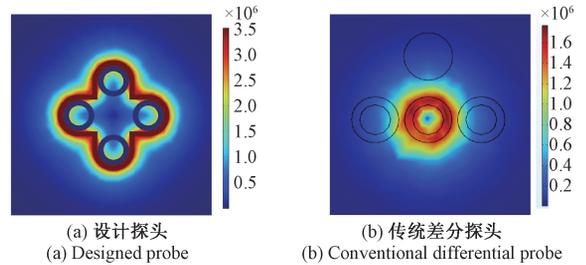


图 7 试件表面涡流分布

Fig. 7 Eddy current distribution on specimen surface

从图 7 中可以看出,十字跑道型激励线圈扩大了覆盖区域的有效涡流场面积和涡流密度,紧密对称的探头结构使涡流呈十字跑道形状规律分布,便于在实际检测过程中,探头向各方向移动,同时相比于圆形激励线圈涡流分布,该形状的涡流分布可能有助于分析判断缺陷裂纹的方向等更多缺陷信息。

此外,探头扫描缺陷是一个动态过程,分析探头信号和缺陷的相对位置关系是进行缺陷定位的前提。以图 5 所示的扫描方向与缺陷位置为例,分析了设计探头位置与电压信号变化的相对关系,如图 8 所示。

从图 8 中可以看出,设计探头在扫描过程中,差分线圈电压信号过零点对应缺陷中心所在位置,且发现当 4 个检测线圈尺寸一致时,才有这一规律。可通过信号过零点的位置对缺陷进行定位。

## 3 仿真检测结果分析

### 3.1 不同方向缺陷检测分析

在利用 COMSOL Multiphysics 有限元仿真软件所建立的飞机多层金属铆接结构缺陷三维检测模型中,缺陷埋深 1 mm,激励频率 5 kHz,激励电流为 0.1 A,以 Y 轴为 0°方向,缺陷绕其中心分别顺时针旋转 0°、45°、90°时,探头沿 X、Y 轴以步长为 1 mm 进行参数化扫描,如图 9 所示。

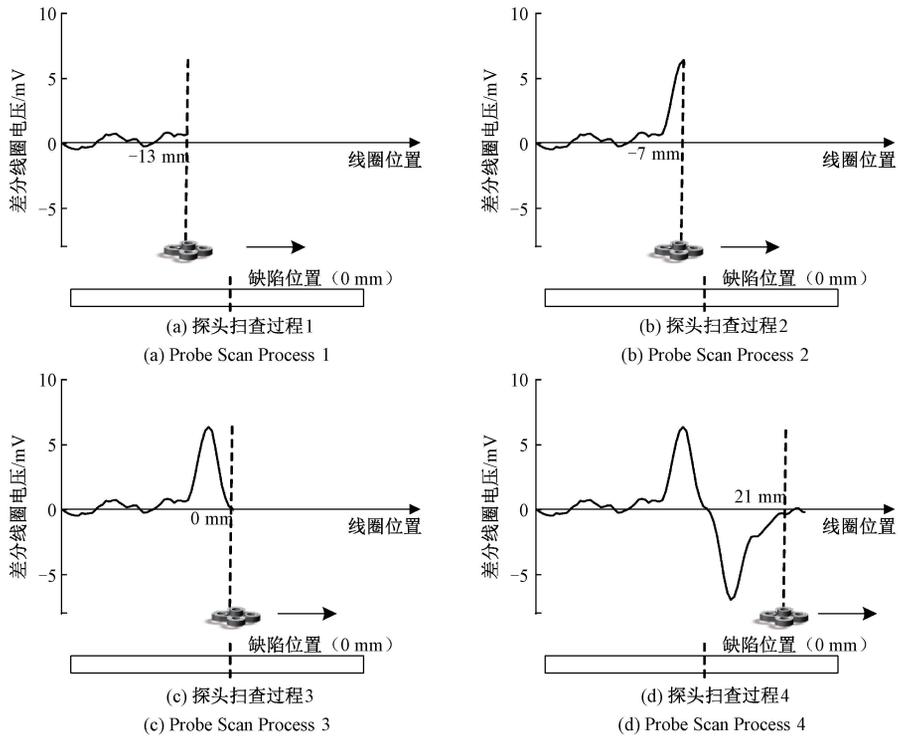


图 8 设计探头扫查缺陷过程图

Fig. 8 Design probe scan defect process diagram

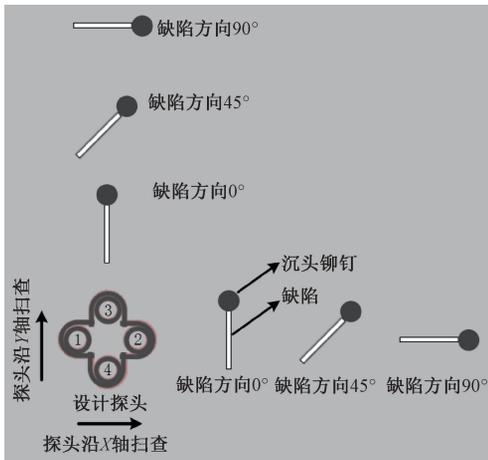


图 9 十字跑道型差分式涡流探头扫查示意图

Fig. 9 Cross-runway-type differential eddy current probe scanning schematic diagram

仿真后得到设计探头差分线圈电压随缺陷角度增加的变化曲线,如图 10 所示。

从图 10 中可以看出,设计探头沿 X 轴和 Y 轴扫查过程中,能够对不同方向缺陷进行有效检测,并获得缺陷的方向信息,避免了缺陷漏检情况的出现。同时,由沿 X 轴扫查结果可知,缺陷方向角度越大,差分线圈电压峰峰值

水平间距越大,相较于缺陷方向 0°,缺陷方向 45°和 90°时,差分线圈电压峰峰值水平间距分别增大 2 和 17 mm;沿 Y 轴扫查,缺陷方向角度越大,差分线圈电压峰峰值水平间距越小,如表 3 所示。

表 3 差分式检测线圈电压峰峰值水平间距

Table 3 Differential detection coil voltage peak-to-peak value horizontal spacing

缺陷角度	峰峰值水平间距(沿 X 轴)/mm	峰峰值水平间距(沿 Y 轴)/mm
0°	14	33
45°	16	17
90°	31	15

设计探头基本实现了对不同方向缺陷的检测。而传统差分探头在对试件缺陷进行涡流检测时,不同的扫查方向和缺陷方向往往会影响检测结果的准确性。为更清晰的进行对比,在建立的三维检测模型中,使用传统差分探头(图 2 所示)对不同方向的缺陷进行扫查。传统差分探头 3 个线圈尺寸和设计探头检测线圈一致,其他模型参数不变,扫查方式与图 9 相同。扫查后电压差分信号结果如图 11 所示。

从图 11(a)中可以看出,当传统差分探头沿 X 轴扫查时,传统差分线圈电压受缺陷方向影响变化较大,对缺

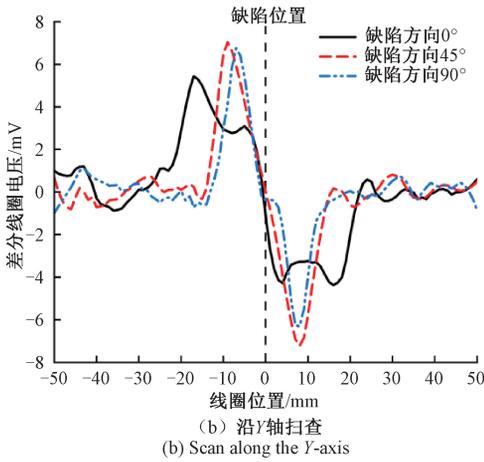
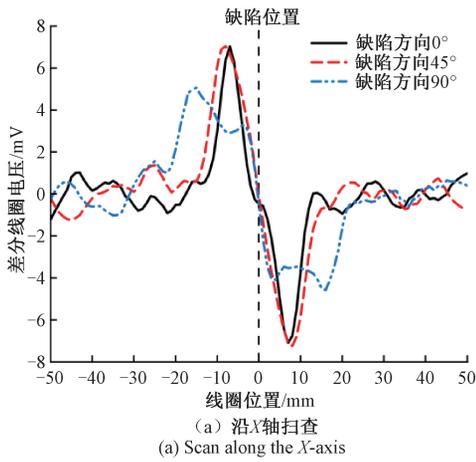


图 10 设计探头差分线圈电压随缺陷方向的变化曲线  
Fig. 10 The variation curve of designed probe differential coil voltage with defect direction

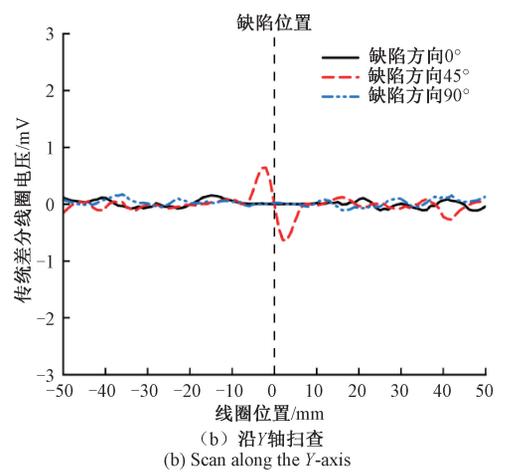
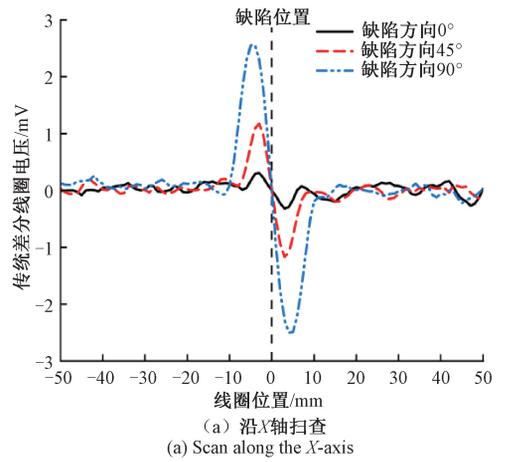


图 11 传统差分探头线圈电压随缺陷方向的变化曲线  
Fig. 11 The variation curve of coil voltage of traditional differential probe with defect direction

陷方向为  $0^\circ$  即小角度缺陷的检测效果较差,易出现漏检;图 11(b)中,传统差分探头沿 Y 轴扫查时,当探头差分检测线圈关于缺陷对称分布时,传统差分线圈电压在  $0\text{ mV}$  处上下波动,无法对缺陷进行定性定量分析。

因此,传统差分探头沿固定方向扫查时,线圈的排布方式和与缺陷的方向、相对位置会对检测结果产生较大影响,尤其当线圈关于缺陷方向对称分布时,差分线圈无法检测出缺陷,出现漏检情况。本文设计探头,克服了传统差分探头扫查缺陷时对某些方向的缺陷不敏感,难以判断疲劳裂纹走向的问题,提高了探头在实际工作环境中的适用性。

### 3.2 不同深度缺陷检测分析

在实现对不同方向缺陷的有效检测分析后,结合飞机多层金属铆接结构特点,进一步研究十字跑道型差分式涡流探头对不同深度缺陷的检测效果。在飞机多层金属铆接结构缺陷三维检测模型中,设置缺陷埋深分别为  $0、2、4$  以及  $6\text{ mm}$ ,即在表面和第  $1\sim 3$  层铝合金平板中,

缺陷角度  $0^\circ$ ,激励频率  $20\text{ kHz}$ ,其他参数不变。通过沿 X 轴仿真扫查,得到设计探头差分式检测线圈电压信号随缺陷埋深增加的变化曲线,如图 12 所示。

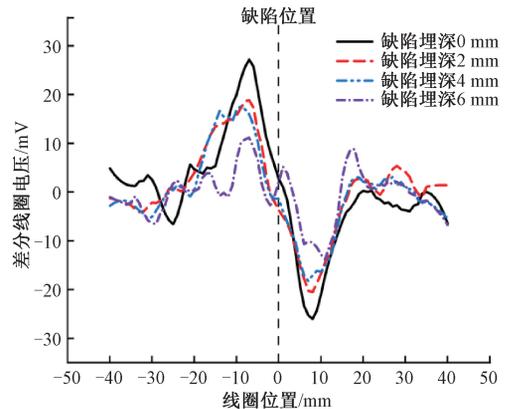


图 12 设计探头差分线圈电压随缺陷埋深的变化曲线  
Fig. 12 The variation curve of designed probe differential coil voltage with defect depth

从图 12 中可以看出,差分式检测线圈电压变化曲线关于缺陷位置基本呈中心对称,且随着缺陷埋深的增加,电压大小与缺陷埋深呈负相关,缺陷埋深越深电压幅值越小,对比缺陷埋深 0 mm,缺陷埋深为 2、4、6 mm 时,电压峰值分别降低 8.17、9.59 和 16.03 mV。缺陷埋深为 6 mm 时,电压峰值明显降低,主要是因为受涡流的趋肤效应影响,但仍能分析出有效的缺陷信息。如表 4 所示。

表 4 差分式检测线圈电压峰峰值垂直间距

Table 4 Differential detection coil voltage peak-to-peak value vertical spacing

缺陷埋深/mm	峰峰值垂直间距/mV
0	53.24
2	39.37
4	35.85
6	25.05

仿真结果表明,根据设计探头差分式检测线圈电压峰峰值垂直间距,能够对飞机多层金属铆接结构缺陷埋深 0~6 mm 进行有效检测。

### 3.3 检测分辨力分析

在实际的检测需求中,工程师同样关注裂纹的长度,以便于预测其发展趋势。实验以不同裂纹长度为例,对比设计探头与 TR 探头在缺陷检测中的分辨力差异。TR 探头包含一个检测线圈和一个激励线圈,线圈参数与设计探头检测线圈参数相同,设置裂纹长度 5~20 mm 内连续变化,取裂纹长度 5 mm 时检测线圈电压峰值为 1,得到设计探头和 TR 探头检测线圈电压峰值随不同裂纹长度的变化,如图 13 所示。

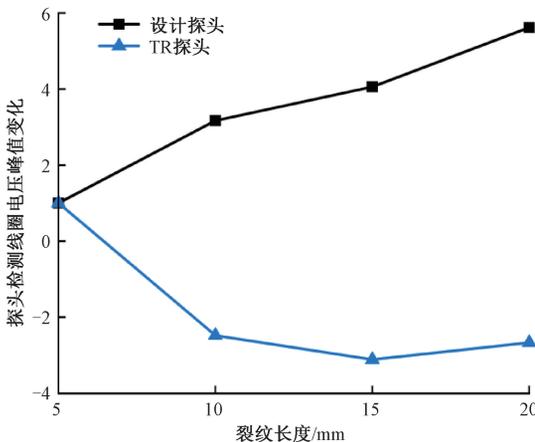


图 13 探头检测线圈电压峰值随不同裂纹长度的变化  
Fig. 13 Probe detection coil voltage peak with crack length

从图 13 中可以看出,随着裂纹长度的增长,设计探头检测线圈电压峰值逐渐增大,增幅明显,大致呈现出线性增长的趋势;TR 探头检测线圈电压变化趋势较为不稳

定,裂纹长度从 10~15 mm 时,检测线圈电压不降反升,且变化幅度较小,对于超过 10 mm 长度的裂纹分辨力较低。因此,在对裂纹长度检测中,设计探头具有更好的线性区间与分辨力。

### 3.4 提高效应抑制效果分析

在涡流检测中,提高效应一直是困扰涡流检测准确性和精度的主要难题。在检测过程中,因被测对象表面的非导电涂层、污染物等引起厚度不均,以及人为或机器振动使得探头的提高高度发生变化,从而影响检测结果,使得检测的准确性和精度大大降低。设计探头中的差分检测线圈是抑制提高效应的一种方式,为验证抑制效果,将其与传统 TR 探头进行比较,TR 探头参数同前文描述。设置提高距离为 0.5~5.5 mm,步长为 0.1 mm,通过仿真扫查,得到设计探头差分式检测线圈和 TR 探头检测线圈电压随提高高度增加的变化曲线,如图 14 所示。

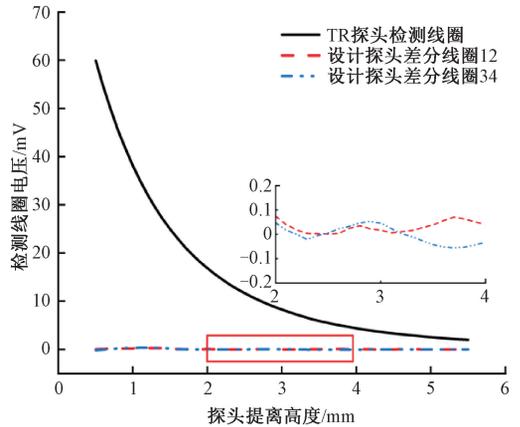


图 14 设计探头和 TR 探头检测线圈电压随提高高度的变化  
Fig. 14 Design probe and TR probe detection coil voltage with lift-off height

从图 14 中可以看出,TR 探头检测线圈电压与探头提高高度的增加呈负相关且变化显著,提高高度从 0.5~1、3 和 5 mm 时,检测线圈电压分别降低 21.85、51.68 和 57.41 mV,其中提高高度达 3 mm 时,检测线圈电压线圈趋势有所减缓。可见,TR 探头受提高高度影响较大。而设计探头的差分检测线圈 12 和差分检测线圈 34 电压受提高高度影响较小,线圈电压稳定在 0 mV 上下小范围波动。因此相比于 TR 探头,设计探头具有更好的提高效应抑制效果,增强了扫查中的抗干扰能力,能够适应更为复杂的工作环境。

### 3.5 探头不同设计参数的优化分析

探头的不同设计参数会对检测结果产生影响,根据式(2)和(3)可知,被测试件的涡流密度以及反映在接收线圈上的电压变化主要与探头设计参数中的线圈尺寸相关。因此,通过改变探头中线圈的内外径、高度等主要参

数大小,分析其对检测结果的影响从而选取相对更优的探头线圈参数。

在飞机多层金属铆接结构缺陷三维检测模型中,设置缺陷埋深 0 mm,缺陷长宽厚尺寸为 5 mm×1 mm×1 mm,所有线圈高度为 2 mm,激励线圈外径逐渐增加,其他内外径同比例增加,不同内外径尺寸的设计探头如表 5 所示。仿真得到设计探头差分式检测线圈电压信号随线圈内外径的变化曲线,如图 15 所示。

表 5 不同线圈内外径尺寸的设计探头

Table 5 Design probe of different coil inner and outer diameter size

参数名称	尺寸 1	尺寸 2	尺寸 3	尺寸 4
激励线圈外径 $R_1/mm$	3.5	4.0	6.0	8.0
激励线圈内径 $R_2/mm$	2.5	3.0	5.0	7.0
激励线圈直道 $L_1/mm$	2.0	2.5	4.5	6.5
检测线圈外径 $r_1/mm$	2.4	2.9	4.9	6.9
检测线圈内径 $r_2/mm$	1.4	1.9	3.9	5.9

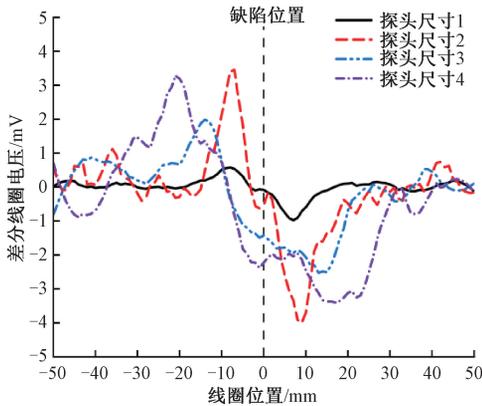


图 15 差分线圈电压随线圈内外径的变化曲线

Fig. 15 The variation curve of differential coil voltage with coil inner and outer diameter

从图 15 中可以看出,尺寸 1 探头扫查时对于缺陷变化很小,探头尺寸 3 和 4 随尺寸的增大,其电压峰值和变化趋势较不稳定,出现尺寸增大电压峰值反而降低的情况。主要是由于线圈尺寸参数过大导致涡流易绕过细小缺陷而不敏感。探头尺寸 2 相比于其他探头尺寸,其差分式检测线圈电压峰值最大,且电压曲线变化趋势稳定,并关于缺陷位置呈中心对称,这表示探头尺寸 2 对缺陷检测具有更高的分辨力和灵敏度,同时能够通过曲线中心对称点定位缺陷位置。综合考虑,选取探头尺寸 2 为设计探头相对最优的探头线圈参数。

当线圈内外径选定后,设置线圈高度在 1.5~6.0 mm 范围内增加,仿真得到设计探头差分式检测线圈电压信号随线圈高度的变化曲线,如图 16 所示。

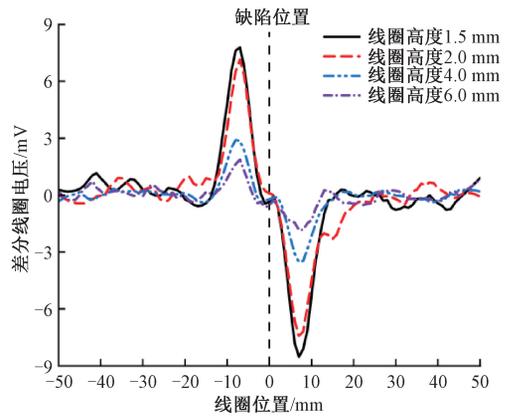


图 16 差分线圈电压随线圈高度的变化曲线

Fig. 16 The variation curve of differential coil voltage with coil height

从图 16 中可以看出,随着线圈高度的增加,差分式检测线圈电压不断降低,灵敏度和分辨率也随之降低,且 2 mm 以后降幅明显,线圈高度 1.5~2 mm 之间检测效果接近。根据式(2)可知,线圈高度增加将有更多的匝数,探头产生的涡流密度会更强,更有利于检测微小缺陷,且从线圈制备难易角度考虑,更高的线圈易于制备,因此选择线圈高度 2 mm 作为设计探头相对最优的探头线圈参数。

## 4 结论

本文针对飞机多层金属铆接结构等复杂飞机构件的无损检测,设计了一种新型差分式涡流检测探头。通过三维有限元检测模型,分析了十字跑道型差分式涡流探头的适用性和检测效果。结合仿真结果,主要得出了如下结论:

1) 新型十字跑道型差分式涡流探头能够对缺陷方向进行判断,解决了传统差分探头对缺陷方向、扫查方向敏感的局限性,有助于了解缺陷扩展情况,制定更加科学的缺陷维修周期和策略。

2) 结合飞机多层金属铆接结构特点,设计探头能够对埋深 0~6 mm,尺寸为 10 mm×1 mm×1 mm 的缺陷进行有效检测,具有较好的灵敏度和检测能力。

3) 设计探头中的差分检测线圈与传统 TR 探头检测线圈相比,能够有效的抑制提离效应,且对缺陷长度变化具有更高的分辨力。

综上,本文研究内容对飞机多层金属铆接结构缺陷检测和电涡流探头的设计开发具有一定的指导意义和参考价值。但在实际应用中可能存在一些挑战,因此,作者未来进一步的工作如下:

1) 对十字跑道型差分式新型涡流探头进行制备,在

实际工况下进一步分析检测效果,并进行探头的优化或改进。

2)对更多跑道型结构探头进行研究和对比,如米字型等。进一步总结在检测工况不同的需求下新型电涡流探头的设计原则。

## 参考文献

- [ 1 ] 汪存显,高豪迈,龚煦,等.航空铆钉连接件的抗冲击性能[J].航空学报,2019,40(1):289-301.  
WANG C X, GAO H M, GONG X, et al. Impact responses of aeronautic riveting structures [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2019, 40 ( 1 ): 289-301.
- [ 2 ] 崔明慧.波音737飞机紧固件的应用研究[J].航空制造技术,2013(13):96-99.  
CUI M H. Fastener application in Boeing737 aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013 ( 13 ): 96-99.
- [ 3 ] RAKOW A, CHANG F K. A structural health monitoring fastener for tracking fatigue crack growth in bolted metallic joints [J]. Structural Health Monitoring: An International Journal, 2012,11(3):253-267.
- [ 4 ] 刘平政,宋凯,宁宁,等.飞机紧固件孔周裂纹检测远场涡流传感器设计及优化[J].仪器仪表学报,2019,40(6):1-8.  
LIU P ZH, SONG K, NING N, et al. Design and optimization of remote field eddy current sensor for crack detection around the hole of aircraft fasteners [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019,40(6):1-8.
- [ 5 ] 孙侠生,苏少普,孙汉斌,等.国外航空疲劳研究现状及展望[J].航空学报,2021,42(5):45-70.  
SUN X SH, SU SH P, SUN H B, et al. Current status and prospect of overseas research on aeronautical fatigue[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42 ( 5 ): 45-70.
- [ 6 ] 赵本勇,宋凯,宁宁,等.飞机铆接件隐藏缺陷的远场涡流检测探头优化与试验[J].航空学报,2020,41(1):271-281.  
ZHAO B Y, SONG K, NING N, et al. Optimization and experimentation of remote field eddy current testing probe for hidden defects of aircraft riveting parts [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41 ( 1 ): 271-281.
- [ 7 ] 赵友全,刘潇,陈玉榜,等.微型涡流电导率测量传感器的优化设计[J].电子测量与仪器学报,2015,29(4):598-603.  
ZHAO Y Q, LIU X, CHEN Y B, et al. Optimizing design for miniature eddy current conductivity measurement sensor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29 ( 4 ): 598-603.
- [ 8 ] HUANG P, ZHANG G, WU Z, et al. Inspection of defects in conductive multi-layered structures by an eddy current scanning technique: Simulation and experiments[J]. NDT & E International, 2006,39(7):578-584.
- [ 9 ] 宋凯,方志泓,崔西明,等.飞机铆接构件 PRFECT探头的线圈夹角影响[J].航空学报,2021,42(10):406-415.  
SONG K, FANG ZH H, CUI X M, et al. Influence of coil angles of PRFECT probe of aircraft riveting component[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021,42(10):406-415.
- [ 10 ] 张程杰,胡明慧,徐小雄.钛合金深层裂纹缺陷涡流检测仿真与实验研究[J].传感技术学报,2021,34(3):305-310.  
ZHANG CH J, HU M H, XU X X. Simulation and experimental research on the deep crack defects of titanium alloy with eddy current testing [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators,2021,34(3):305-310.
- [ 11 ] 刘正帅,李勇,任淑廷,等.构件损伤脉冲调制涡流检测探头新构型及性能综合分析[J].电子测量与仪器学报,2021,35(9):170-178.  
LIU ZH SH, LI Y, REN SH T, et al. Novel structure and performance analysis of pulse-modulation eddy current probes for testing of damages in structural components[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation,2021,35(9):170-178.
- [ 12 ] 朱玉龙,赵迎松,方阳,等.孔边裂纹的旋转涡流检测[J].中国机械工程,2023,34(8):883-891.  
ZHU Y L, ZHAO Y S, FANG Y, et al. Rotating eddy current testing for inspection of cracks at hole edge[J]. China Mechanical Engineering, 2023,34(8):883-891.
- [ 13 ] SONG K, OUYANG Y, FANG Z, et al. Simulation and experiment of array remote-field eddy current sensor for hole edge defect of aircraft high lock bolt [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43 ( 5 ): 580-591.
- [ 14 ] SUN H, ZHANG Y M, YI J Y, et al. Crack quantification of bolted joints by using a parallelogram eddy current array sensing film [J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2022,39(1):98-107.
- [ 15 ] CHEN W, WU D, WANG X, et al. A self-frequency-conversion eddy current testing method [J]. Measurement: Journal of the International Measurement Confederation, 2022,195.

- [16] WANG R, BAO B, WANG W, et al. Research on remote-field eddy current focusing method for detecting hidden defects in aircraft riveted components[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2023,42(4):95.
- [17] LIAO C, WANG R, LV C, et al. Research on alternating current field measurement method for buried defects of titanium alloy aircraft skin[J]. Sensors, 2024, 24(4):1347.
- [18] 严宇昂, 胡明慧. 铁磁性材料深层缺陷检测的涡流探头仿真优化与设计[J]. 传感技术学报, 2022,35(9):1249-1256.
- YAN Y ANG, HU M H. Simulation and optimization design of eddy current probe for deep defects in ferromagnetic materials[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2022,35(9):1249-1256.
- [19] 李满宏, 王经天, 吴玉, 等. 电涡流传感器性能优化关键技术[J]. 仪器仪表学报, 2019,40(7):233-243.
- LI M H, WANG J T, WU Y, et al. Key technologies for eddy current sensor performance optimization [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019,40(7):233-243.
- [20] 陈涛, 张赛, 肖小齐, 等. 跑道型差动式涡流探头设计及其性能研究[J]. 工程设计学报, 2020,27(6):781-785.
- CHEN T, ZHANG S, XIAO X Q, et al. Design and performance study of runway-type differential eddy current probe[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2020, 27(6):781-785.
- [21] 周德强, 王俊, 潘萌, 等. 脉冲涡流矩形差分探头缺陷检测机理[J]. 中国机械工程, 2016,27(22):

3032-3037.

ZHOU D Q, WANG J, PAN M, et al. Mechanism of defect detections for rectangular differential probes of pulsed eddy current testing [J]. China Mechanical Engineering, 2016,27(22):3032-3037.

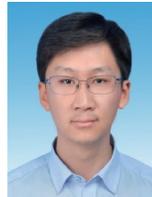
### 作者简介



**徐昊**, 2021年于昆明理工大学获得学士学位, 现为昆明理工大学民航与航空学院硕士研究生, 主要研究方向为金属材料电磁无损检测。

E-mail: 443292718@qq.com

**Xu Hao** received his B. Sc. degree from Kunming University of Science and Technology in 2021. Now he is a M. Sc. candidate at the faculty of civil aviation and aeronautics, Kunming University of Science and Technology. His main research interest includes electromagnetic nondestructive testing of metal materials.



**包俊**(通信作者), 2020年于昆明理工大学获得博士学位, 现为昆明理工大学讲师, 主要研究方向为电涡流无损检测技术及应用、电涡流解析建模与涡流成像技术、复合材料电磁无损检测。

E-mail: jun.bao@kust.edu.cn

**Bao Jun** (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Kunming University of Science and Technology in 2020. Now he is a lecturer of Kunming University of Science and Technology. His main research interests include eddy current nondestructive testing technology and application; eddy current analytical modeling and eddy current imaging technology; electromagnetic nondestructive testing of composite materials.