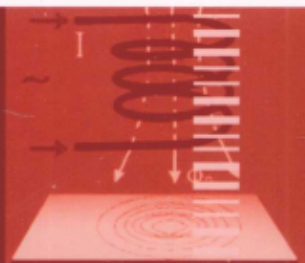


中国民航无损检测人员培训教材 **CANDTB**

# 航空器涡流检测

■ 民航无损检测人员资格鉴定与认证委员会 编

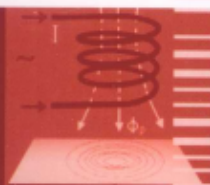
Hangkongqi  
Woliu Jiance



中国民航出版社

# Hangkongqi Woliu Jiance

中国民航无损检测人员培训教材



- 航空器无损检测综合知识
- 航空器磁粉检测
- 航空器渗透检测
- 航空器涡流检测
- 航空器超声检测
- 航空器射线检测

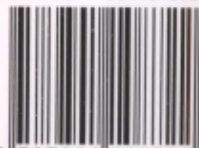
责任编辑：刘庆胜

封面设计：



GONGSHEN

ISBN 978-7-80110-872-2



9 787801 108722 >

定价：37.00 元

中国民航无损检测人员培训教材

# 航空器涡流检测

民航无损检测人员资格鉴定与认证委员会 编

中国民航出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

航空器涡流检测/民航无损检测人员资格鉴定与认证  
委员会编. 北京: 中国民航出版社, 2008. 9  
中国民航无损检测人员培训教材  
ISBN 978-7-80110-872-2

I. 航... II. 民... III. 航空器-涡流发生器-检测-技  
术培训-教材 IV. V224

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 135868 号

责任编辑: 刘庆胜

### 航空器涡流检测

民航无损检测人员资格鉴定与认证委员会 编

---

出版 中国民航出版社  
社址 北京市朝阳区光熙门北里甲 31 号楼 (100028)  
排版 中国民航出版社照排室  
印刷 中国电影出版社印刷厂  
发行 中国民航出版社 (010) 64297307 64290477  
开本 787 × 1092 1/16  
印张 10.25  
字数 230 千字  
版本 2009 年 4 月第 1 版 2009 年 4 月第 1 次印刷

---

书号 ISBN 978-7-80110-872-2  
定价 37.00 元

(如有印装错误, 本社负责调换)

# 前 言

民用航空使用的航空器，是用当今世界最新技术制造的。随着我国改革开放和经济的繁荣，民用航空事业飞速发展，航空企业引进了大批新飞机，而原有的飞机逐步老龄化，这些变化促进了航空维修业迅速发展。航空维修/检查是航空器设计的延伸，在保持航空器固有安全性和可靠性水平等方面发挥着关键作用，是航空公司使用航空器不可缺少的行业，无损检测（NDT）是航空器维修、改装和保持持续适航的重要手段。

无损检测具有显著的行业特征，不同的行业根据其检测对象的不同而采用了不同的检测方法和技术。航空器无损检测侧重于在役航空器的原位检测，主要针对民用航空器使用过程中因疲劳、腐蚀、过载和意外损伤等原因造成的缺陷进行检测。为了有针对性地培训航空器无损检测人员，民航无损检测人员资格鉴定与认证委员会先后选用过中国机械工程学会无损检测学会培训教材、航空航天无损检测人员资格鉴定培训教材、中国航空维修 NDT II 级教材和国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训教材。这些教材是由国内各行业无损检测知名专家学者编著，内容详尽，论述准确，具有很高的理论水平和很强的实用性，为民航无损检测人员培训提供了很好的指导。但是上述教材侧重于各自行业特点，很少涉及在役航空器，与民用航空器无损检测实际联系不紧密。

为了进一步提高民航无损检测人员培训质量，民航局飞行标准司要求民航无损检测人员资格鉴定与认证委员会根据航空器维修无损检测的特点，编写一套具有本行业特色的无损检测人员技术资格培训教材。按照飞行标准司的要求，民航无损检测人员资格鉴定与认证委员会组织了民航系统的专家和技术人员，在总结多年从事无损检测人员培训和实际检测工作经验的基础上，参考国内其他行业培训教材和主要机型的 NDT 手册等资料，完成了本套教材的编写。

本套教材作为民航无损检测 2、3 级人员培训和自学使用，其内容分为基本部分和扩展部分，扩展部分注有“\*”号，不作为 2 级人员资格鉴定考试要求。教材内容翔实，篇幅较多，教员可根据培训学时和培训大纲的要求有所取舍。

本套教材参考了中国机械工程学会无损检测学会培训教材、航空航天无损检测人员资格鉴定培训教材、国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训教材，在此表示感谢！

本套教材包括《航空器无损检测综合知识》、《航空器磁粉检测》、《航空器渗透检测》、《航空器涡流检测》、《航空器超声检测》和《航空器射线检测》。

其他检测方法的教材将根据需要陆续增加。

本教材在基础理论方面与先前采用过的教材保持了一致性，在专业知识和实际应用方面加入了大量航空器维修无损检测的相关知识和实例，重点讲述在役民用航空器原位无损检测基本要求、规范和程序。体现民用航空器维修的特色，将民用航空器无损检测中的典型事例升华为教材，指导检测实践，是本套教材的创新。本教材经过 2007—2008 年几期培训班试用，后又进行了补充修改，现才正式出版。

参与本套教材策划、编写、审核的人员有徐超群、陈伦、许万忠、王学民、潘建华、聂有传、张晓、李光浩、侯树聪、常士基、李淑贤、刘兆江、付杭君、胡小虎、杨剑英、郑勇、苏金波、胡良进、刘仲文、张循等。

《航空器涡流检测》一书共分 9 章，其中第 1、2、3、5、7 章由张晓编写，第 4 章由郑勇编写，第 6 章 6.1 节由张晓编写，6.2、6.3、6.4 节由郑勇编写，6.5、6.6 节由陈江明编写，第 8 章由陈江明编写，第 9 章由郑勇编写，全书由张晓统稿，许万忠、丁永新、查文吉审定，许万忠主审。

由于编写、审核人员的水平有限和时间仓促，教材中难免存在缺陷和错误，欢迎指正。

民航无损检测人员资格鉴定与认证委员会  
2009 年 3 月



## 目 录

第1章 绪论	1
1.1 涡流检测的发展	1
1.1.1 涡流检测方法	1
1.1.2 涡流检测技术的发展	1
1.2 涡流检测的特点	2
1.2.1 涡流检测的适用性	2
1.2.2 涡流检测的局限性	2
1.3 涡流检测的应用	3
第2章 涡流检测的物理基础	4
2.1 电的基本知识	4
2.1.1 电荷	4
2.1.2 电场	4
2.1.3 电势与电势差	6
2.2 材料的电性能	7
2.2.1 金属材料导电的物理本质	7
2.2.2 电流和电阻	8
2.2.3 电阻的物理意义	10
2.2.4 影响金属导电性的主要因素	10
2.2.5 典型材料的导电性	12
2.3 磁的基本知识	13
2.3.1 基本磁现象	13
2.3.2 磁场	14
2.3.3 描述磁场的几个基本物理量	15
2.3.4 几种通用线圈的磁场	17

2.4 材料的磁特性	20
2.4.1 物质的磁性	20
2.4.2 铁磁性材料的磁化规律*	20
2.4.3 磁滞回线*	22
2.4.4 磁畴*	22
2.4.5 居里温度	23
2.4.6 影响铁磁性材料磁性的因素	24
2.5 交流电与交流电路	25
2.5.1 电流	25
2.5.2 正弦交流电	26
2.5.3 正弦交流电的几种表示方法	29
2.5.4 交流电路的阻抗	31
<b>第3章 涡流检测基本原理</b>	<b>33</b>
3.1 电磁感应的的基本定律	33
3.1.1 楞次定律	33
3.1.2 法拉第电磁感应定律	34
3.2 自感与互感	36
3.2.1 自感	36
3.2.2 互感	37
3.3 涡流及其特性	38
3.3.1 涡旋电场*	38
3.3.2 涡流	39
3.3.3 涡流密度*	39
3.3.4 集肤效应与涡流渗透深度	40
3.3.5 有效渗透深度	41
3.4 线圈的阻抗和归一化阻抗	41
3.4.1 线圈的阻抗	41
3.4.2 耦合线圈的阻抗平面图	44
3.4.3 归一化的阻抗平面图	44
3.5 有效磁导率和特征频率	46
3.5.1 有效磁导率	46
3.5.2 特征频率	47
3.5.3 涡流相似律	48
3.5.4 涡流检测原理	49



3.6 穿过式线圈的阻抗分析	49
3.6.1 线圈感应电动势与阻抗	49
3.6.2 含导电圆柱体穿过式线圈的阻抗分析	50
3.7 放置式线圈的阻抗分析	55
3.7.1 电导率对阻抗的影响	56
3.7.2 提高效应对阻抗的影响	56
3.7.3 磁导率对阻抗的影响	56
3.7.4 试验频率对阻抗的影响	57
3.7.5 工件厚度对阻抗的影响	57
3.7.6 线圈直径对阻抗的影响	57
3.7.7 缺陷对阻抗的影响	58
<b>第4章 涡流检测设备</b>	<b>60</b>
4.1 涡流检测线圈	60
4.1.1 检测线圈的分类	61
4.1.2 检测线圈的特点	64
4.1.3 涡流信号的形成	64
4.2 涡流检测仪器	65
4.2.1 检测仪器的分类	65
4.2.2 涡流探伤仪的组成部分和作用	68
4.2.3 涡流仪的基本电路	70
4.3 试样	73
4.3.1 标准试样	73
4.3.2 对比试样	76
4.4 涡流检测的辅助器材与装置	78
4.4.1 涡流检测辅助器材	79
4.4.2 涡流检测辅助装置	80
<b>第5章 涡流检测基本技术</b>	<b>83</b>
5.1 放置式线圈涡流探伤技术	83
5.1.1 放置式线圈的结构形式与特点、应用范围	83
5.1.2 放置式线圈探头的选择	83
5.1.3 放置式线圈检测要点	85
5.1.4 仪器主要参数的调节	86
5.2 涡流电导率检测技术	88

5.2.1	电导率测量探头的特点、形式与应用	89
5.2.2	电导率标准试块的选择、特点及其应用	89
5.2.3	电导率测量要点	90
5.3	涂层测厚及薄板测厚技术	91
5.3.1	仪器参数选择	91
5.3.2	检测要点	91
5.4	穿过式线圈涡流探伤技术	91
5.4.1	穿过式线圈的结构形式与特点、应用范围	92
5.4.2	穿过式线圈检测参数的选择	92
5.4.3	穿过式线圈检测要点	93
<b>第6章</b>	<b>涡流检测在民用航空器维修中的应用</b>	<b>94</b>
6.1	表面疲劳裂纹检查	94
6.1.1	表面疲劳裂纹的特征	94
6.1.2	表面疲劳裂纹的多发位置	95
6.1.3	表面疲劳裂纹检测要点	95
6.1.4	典型飞机结构表面疲劳裂纹扫查	96
6.1.5	飞机结构表面裂纹检查的有关问题	99
6.2	多层结构内部裂纹检查	100
6.3	结构腐蚀检查	104
6.4	电导率测量	106
6.4.1	电导率值测量	106
6.4.2	热损伤区检测	107
6.5	厚度测量*	109
6.5.1	膜层厚度测量	109
6.5.2	金属间隙测量*	112
6.5.3	民用航空涡流测厚的应用	113
6.6	紧固件孔的涡流检测	115
6.6.1	紧固件孔的涡流检测探头	115
6.6.2	紧固件孔检测的对比试样	117
6.6.3	紧固件孔的自动扫查检测	118
6.6.4	航空器维修铝件紧固件孔涡流检测	119

<b>第7章 非常规涡流检测技术与应用*</b> .....	124
7.1 概述 .....	124
7.2 磁光检测 .....	124
7.2.1 磁光检测的基本原理 .....	124
7.2.2 磁光检测装置 .....	125
7.2.3 磁光检测的应用 .....	126
7.3 多频涡流检测技术 .....	127
7.3.1 多频涡流的基本原理 .....	127
7.3.2 多频涡流的应用 .....	127
7.4 脉冲涡流检测技术 .....	128
7.4.1 脉冲涡流检测的基本原理 .....	128
7.4.2 脉冲涡流检测的应用 .....	128
7.5 远场涡流检测技术 .....	130
7.5.1 远场涡流检测的特点和组成 .....	130
7.5.2 远场涡流检测的应用 .....	131
7.6 涡流阵列检测技术 .....	131
7.6.1 涡流阵列检测的基本原理 .....	131
7.6.2 涡流阵列检测的应用 .....	132
<b>第8章 涡流检测标准及技术手册</b> .....	133
8.1 国内主要涡流检测标准 .....	133
8.1.1 涡流检测相关国家标准 .....	133
8.1.2 国内其他涡流检测相关标准 .....	135
8.2 国外相关涡流检测标准 .....	135
8.2.1 国际标准化组织涡流检测标准* .....	136
8.2.2 美国材料试验协会涡流检测标准* .....	136
8.2.3 美国军用标准及波音公司涡流检测标准 .....	137
8.3 国内民用航空器的涡流检测标准 .....	138
8.3.1 2006 版民航涡流检测标准介绍 .....	138
8.4 民用航空器涡流检测技术手册 .....	140
8.4.1 波音 NDT 手册介绍 .....	140
8.4.2 空客 NDT 手册介绍 .....	142
8.4.3 空客涡流检测程序 .....	143

<b>第9章 涡流检测实验</b> .....	145
9.1 基础试验 .....	145
实验一 涡流有效渗透深度实验.....	145
实验二 边缘效应实验.....	146
9.2 涡流探伤实验 .....	147
实验三 铝合金表面高频涡流探伤.....	147
实验四 钢表面高频涡流探伤.....	148
实验五 铝合金近表面低频涡流探伤.....	148
9.3 涂(膜)层测厚实验 .....	149
实验六 铝合金表面漆层厚度的测量实验.....	149
9.4 电导率测量实验 .....	149
实验七 铝合金板材的电导率测试实验.....	149

## 参考文献

# 第1章 绪论

## 1.1 涡流检测的发展

### 1.1.1 涡流检测方法

飞机维修，特别是在机体结构维修中要求检查出机体结构中存在的裂纹，尤其是疲劳裂纹，由于机体结构复杂，目前广泛使用的是铝合金结构的组合件，渗透、磁粉等用于表面缺陷检查的无损检测方法对在役飞机结构缺陷进行原位检查时往往受到很大限制。渗透检测工艺控制因素多、时间长，而且存在污染问题，磁粉检测对于现代飞机广泛使用的铝合金材料无能为力，因此需要寻找新的方法。由于自身所具有的特点和优势，涡流检测方法逐渐成为飞机维修，特别是飞机机体结构和部件检查、维修中的一种重要无损检测方法。

### 1.1.2 涡流检测技术的发展

涡流检测技术的建立和发展与电磁理论的发展是密切相关的。1831年，法拉第在许多人进行过的电磁试验的基础上，发现了电磁感应现象，即变化的磁场能够产生电磁，并总结出了电磁感应定律，电磁感应定律是用来阐述涡流检测原理的基本依据。

1873年，麦克斯韦用完整的数学方程式将前人的成果表达出来，建立了系统严密的电磁场理论——麦克斯韦方程式，它是电磁现象的研究基础，也是涡流的理论基础。

1879年，休斯通过实验，首先利用感生电流的方法对不同金属和合金进行了判断试验，揭示了应用涡流对导电材料和零件进行检测的可能性。1930年，法罗首先将涡流法应用于无损检测，在1935年完成了检测仪器的研制，包括初级激励线圈、次级测量线圈、磁饱和线圈、平衡电路、高频放大器、鉴频器、解调器、低频脉冲放大器、滤波器等，这些基础电路到目前为止仍然是现代涡流仪的基本组成部分，但由于各种试验参数对涡流检测的影响在理论上的研究还不充分，不能找到抑制干扰的有效办法。

在1950—1954年间，福斯特发表了一系列的论文，包括消除涡流仪中某些干扰因素的理论分析和试验结果，还研制了用阻抗分析法工作的有补偿干扰因素的仪器，开创了现代涡流检测方法和设备的研制工作，使涡流检测成为几种常规无损检测方法中重要

的一种。

20 世纪 70 年代以来，计算机技术和信息理论的发展促进了涡流检测原理的理论研究，涡流仪的性能得到了很大的改进，许多非常规涡流检测方法也逐步在工程中得到应用，如远场涡流、磁光涡流、脉冲涡流等等，涡流检测方法的应用范围得到进一步扩大。

## 1.2 涡流检测的特点

涡流检测的物理基础是电磁感应原理，电磁感应是指电和磁之间相互感应的现象。利用电磁感应进行的涡流检测，就是由于涡流传感器（通常称为检测线圈）中的交变电流在导电试件中会感应出涡流，涡流的各种电性能参数与导电试件有密切的关系，当导电试件的不同物理特性发生变化时会引起试件中涡流场的改变，从而导致涡流传感器的有关参数发生变化。涡流检测就是利用这种特点进行的。

相比其他常规无损检测方法，涡流检测具有其明显特点。

### 1.2.1 涡流检测的适用性

涡流检测的适用性和优点：

(1) 适用于导电材料。从检测原理上看，只要试件具有导电性，就能够使用涡流检测方法进行检测，因而涡流检测在工程材料的检测中具有十分重要的意义，各种金属材料都可以应用涡流检测。在某些新型材料的检测中，甚至一些导电的非金属材料也都能使用涡流检测方法进行检测，如一些石墨及石墨复合材料、导电橡胶等。

(2) 适用于表面及近表面缺陷检测，尤其对宽深比较小的线形缺陷检测灵敏度较高，因此适合对在役飞机使用中产生的疲劳裂纹等缺陷进行检测。

(3) 适用对材料电磁参数、涂层和板材厚度进行检测。由于试件中的涡流受各种参数影响会发生变化，因此通过检测不同的因素对涡流的影响可以检测出试件的不同特性，如电导率、磁导率、涂层厚度、板材厚度、间隙以及旋转件的跳动值等等。

(4) 非接触检测。由于涡流检测是基于电磁感应现象，电磁感应是通过电磁场来进行的，因此涡流检测属于一种非接触的检测方法，不需要耦合介质，对被检表面的要求不高，可以在不去除涂层的情况下进行检测，也可以在高温状态下进行检测，还能进行高速的自动化检测，如对管、棒、线材的自动检测。

### 1.2.2 涡流检测的局限性

涡流检测也存在着一些局限性，在使用涡流检测时应当加以注意：

(1) 涡流检测只能对导电材料进行检测，对于不导电材料无法进行检测，因此目前在现代飞机结构中使用得越来越多的复合材料无法用涡流方法进行检测。

(2) 干扰因素多，由于试件中涡流的改变与试件中许多因素有关，因此涡流检测

的干扰因素较多，需要检测者具有较丰富的经验，能够区别有用信号和干扰信号。

(3) 由于涡流具有集肤效应，涡流的检测深度有限，只能检测试件表面和近表面的缺陷，对试件内部埋藏较深的缺陷检测困难。

(4) 除了部分形状规则的部件可以使用自动化的涡流检测设备进行检测外，大量的在役设备的检测只能使用手动涡流检测，由于涡流感应区域有限，一般只用来进行局部的检测。

(5) 对缺陷的种类、形状和大小等难以判断。

### 1.3 涡流检测的应用

涡流检测在无损检测技术领域具有重要的地位，涡流检测在工程实际中有广泛的应用，主要有以下几个方面：

(1) 缺陷检测。可用于管、棒、线材等原材料生产过程中的质量控制，还可以用于在役设备的缺陷检测，如疲劳裂纹、腐蚀等。

(2) 电导率检测。涡流检测可用于非铁磁性材料的电导率检测，如铝合金的电导率测量、热损伤检测等。

(3) 材料分选。可以使用涡流检测的方法对混料进行材料分选、热处理状态的区分以及材料硬度测试等。

(4) 涂层厚度测量。利用涡流检测的提离效应可以对导电材料基体上的不导电涂层厚度进行测量。

(5) 尺寸测量。涡流检测可以用来对薄板厚度、振动、位移、偏心度等尺寸进行测量。



## 第2章 涡流检测的物理基础

涡流检测与电、磁现象密切相关，在学习涡流检测技术时，需要学习和掌握与涡流检测密切相关的物理基础，如电、磁现象和原理及其描述方法，这样才能进一步学习涡流检测的基本原理和后续的内容。

本章将对电、磁现象，以及电、磁之间相互作用的关系做一个简要的介绍。

### 2.1 电的基本知识

#### 2.1.1 电荷

两个不同材料的物体，例如丝绢和玻璃棒，互相摩擦后，都能吸引羽毛、纸片等轻微物体，这时我们说这两个物体已经处于带电状态，分别带了电（或带了电荷）。处于这种状态的物体称为带电体。实验证明，物体所带的电有两种，而且只有两种，称为正电和负电。带同号电的物体互相排斥，带异号电的物体互相吸引，这种相互作用称为电力。电力与万有引力有些相似，但万有引力总是相互吸引的，而电力却随异号或同号电而有吸引与排斥之分。根据带电体之间的相互作用力的大小，我们能够确定物体所带电荷的多少，表示物体所带电荷多少程度的物理量称为电量。

电荷只能够从一种物体转移到另一物体，或者从物体的一部分转移到另一部分，但电荷既不能被创造，也不能被消灭，即在任一孤立系统中，无论发生怎样的物理过程，该系统电量的代数和总保持不变，这就是电荷守恒定律。

#### 2.1.2 电场

电荷或带电体之间的相互作用不是直接的，这种相互作用是通过电场给予的。19世纪，法拉第提出在带电体周围存在着电场，其他带电体所受到的电力（即电场力）是由电场给予的，这种作用可表示如下：

电荷—电场—电荷

电场是物质的一种形态，与分子、原子等组成的实物一样，也具有能量、动量和质量。相对于观察者为静止的带电体周围所存在的场，称为静电场，静电场的对外表现主

要有：

- (1) 引入电场中的任何带电体都将受到电场所作用的力；
- (2) 电场能使引入电场中的导体或电介质分别产生静电感应现象或极化现象；
- (3) 当带电体在电场中移动时，电场所作用的力将对带电体做功，这表明电场具有能量。

电场中任一点处电场的性质，可以利用试验正电荷  $q$  来进行研究。在电场中的不同点，在一般情况下，试验电荷  $q$  所受力的方向和大小是逐点不同的，但在电场中一给定点处， $q$  所受力的方向和大小却是完全相同的，如果在电场中某给定点处改变试验电荷  $q$  的量值，就会发现  $q$  所受力的方向仍然不变，但力的大小改变了。当  $q$  取各种不同量值时，所受力的方向与相应的  $q$  值之比  $f/q$  却具有确定的量值，因此把比值  $f/q$  和  $f$  的方向作为描述静电场该给定点的性质的一个物理量，称为该给定点处的电场强度，简称场强，场强是矢量，用  $E$  来表示。即：

$$E = \frac{f}{q} \quad (2-1)$$

场强的单位是牛顿/库仑 (N/C)，也可以写成伏特/米 (V/m)。

电场中每一点的场强  $E$  都有一定的方向，因此我们可以在电场中描绘一系列的曲线，使这些曲线上每一点的切线方向都与该点处的场强  $E$  的方向一致，这些曲线叫做电力线，图 2.1 表示某一电场中的一条电力线。为了使电力线不仅表示出电场中场强的方向，而且表示出场强的大小，在做电力线图时我们可以做如下规定：在电场中任一点处，通过垂直于  $E$  的单位面积的电力线数等于该点处  $E$  的量值。

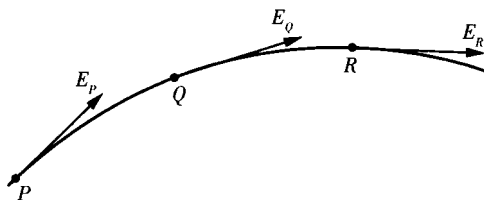


图 2.1 电力线

静电场的电力线有两种性质：第一，不形成闭合回线，也不中断，而是起自正电荷，止于负电荷，这是静电场的重要特性。第二，任何两条电力线不会相交，这说明静电场中每一点的场强只有一个方向。如图 2.2 所示为一些静电场的电力线。

注意，描绘电力线的目的在于能够形象地反映电场中场强的情况，并非电场中真的有这些实际的线存在。