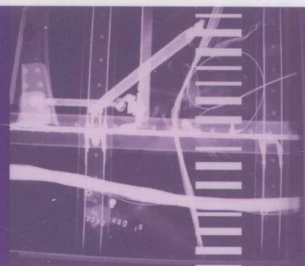


中国民航无损检测人员培训教材 **CANDTB**

航空器射线检测

■ 民航无损检测人员资格鉴定与认证委员会 编

Hangkongqi
Shexian Jiance



中国民航出版社

中国民航无损检测人员培训教材

航空器射线检测

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

航空器射线检测/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, 2009. 8
中国民航无损检测人员培训教材
ISBN 978-7-80110-918-7

I. 航... II. 民... III. 航空器 - 射线检验 - 技术培训 -
教材 IV. V267

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 127882 号

责任编辑: 杜文晔

航空器射线检测

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
地址 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 14
字数 323 千字
版本 2009 年 9 月第 1 版 2009 年 9 月第 1 次印刷

书号 ISBN 978-7-80110-918-7
定价 48.00 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。

《航空器射线检测》一书共分 10 章，其中第 1、2、3、7、8 章由胡良进编写，第 4、9、10 章由聂有传编写，第 5、6 章由付杭君编写，全书由付杭君统稿，丁克美、金景海审定，丁克美主审。

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 射线检测的历史	1
1.2 射线检测基本方法	1
1.3 射线检测的种类	2
1.4 射线检测的优缺点	2
第 2 章 射线检测的物理基础	4
2.1 原子结构*	4
2.2 原子的基本特性	6
2.2.1 质子	6
2.2.2 电子	6
2.2.3 中子	6
2.2.4 原子序数	6
2.2.5 核电荷数	6
2.2.6 原子量	7
2.2.7 同位素	7
2.3 放射性与放射性衰变	7
2.3.1 射线分类	8
2.3.2 X 射线	8
2.3.3 α 粒子	9
2.3.4 β 粒子	9
2.3.5 γ 射线	9
2.3.6 α 衰变	9
2.3.7 β 衰变	10
2.3.8 激发射线	11

2.3.9	电子伏特(eV)	11
2.3.10	放射性衰变单位	11
2.4	电磁辐射及其特性	12
2.4.1	穿透性	13
2.4.2	直线传播	14
2.4.3	电离	14
2.4.4	化学效应	14
2.4.5	荧光效应	14
2.4.6	生物效应	14
2.5	光子与物质的相互作用	15
2.5.1	光电效应	15
2.5.2	康普顿效应	16
2.5.3	电子对效应	17
2.5.4	瑞利散射	18
2.6	射线衰减规律	18
2.6.1	基本概念	18
2.6.2	单色窄束射线衰减规律	20
2.6.3	宽束连续谱射线的衰减规律	22
第3章	射线检测技术	25
3.1	射线检测的基本原理	25
3.2	感光(潜影)基本过程	26
3.3	射线照相的影像质量	27
3.3.1	影像质量的基本因素	27
3.3.2	影像的对比度	27
3.3.3	影像的射线照相不清晰度	30
3.3.4	影像的颗粒度	33
3.4	射线照相灵敏度	34
3.5	透照布置	35
3.5.1	基本透照布置	35
3.5.2	确定透照布置的基本考虑	35
3.5.3	有效透照区	36
3.6	透照基本参数	38
3.6.1	射线能量	38

3.6.2	焦距	39
3.6.3	曝光量	41
3.7	散射线的控制	43
3.8	曝光曲线	46
3.8.1	曝光曲线的类型与制作	46
3.8.2	曝光曲线的应用	49
3.9	暗室处理技术	52
3.9.1	暗室处理概述	52
3.9.2	显影	54
3.9.3	停显或中间水洗	58
3.9.4	定影	58
3.9.5	水洗与干燥	61
3.9.6	胶片自动处理	61
3.9.7	暗室处理的质量控制措施	63
第4章	射线照相检验设备与器材	65
4.1	X射线机	65
4.1.1	X射线机的基本构成与分类	65
4.1.2	X射线机各部分的结构与功用	66
4.1.3	高压发生器	69
4.1.4	冷却系统	70
4.1.5	控制和保护系统	71
4.1.6	高压电缆	72
4.2	X射线产生	72
4.2.1	产生X射线的条件	72
4.2.2	X射线的产生过程	72
4.2.3	X射线谱	73
4.2.4	平方反比定律	74
4.2.5	辐射强度	74
4.3	X射线机的选用	75
4.4	X射线机的使用与维护	75
4.4.1	不能超负荷使用X射线机	75
4.4.2	注意X射线管的老化训练	76
4.4.3	充分预热与冷却	76
4.4.4	日常定期维护	76

4.4.5	X射线机具体探伤时的使用方法(以200EG-S3为例)	76
4.5	γ 射线机*	77
4.5.1	γ 射线设备的结构与特点	78
4.5.2	γ 射线机使用	79
4.6	工业射线胶片	80
4.6.1	射线胶片的结构	80
4.6.2	潜影与射线照相效应的特点	80
4.6.3	胶片的主要感光特性与感光特性曲线	81
4.6.4	射线胶片的分类与选用	84
4.7	增感屏	85
4.7.1	增感概念	85
4.7.2	增感屏的类型与特点	86
4.7.3	增感屏使用	87
4.8	像质计	88
4.8.1	丝型像质计(线型像质计)	88
4.8.2	阶梯孔型像质计*	90
4.8.3	平板孔型像质计*	90
4.9	射线照相检验常用的其他设备和器材	92
第5章	射线检测的应用	94
5.1	航空器维修中射线检验的基本要求	94
5.1.1	人员	94
5.1.2	检测方法的选择	94
5.1.3	飞机结构及部件位置和接近方法	94
5.2	典型航空器零/部件射线照相检验技术应用	95
5.2.1	射线照相检验技术应用——铸件检验技术	95
5.2.2	射线照相检验技术应用——焊接件检验技术	97
5.2.3	射线照相检验技术应用——飞机结构组合件检验技术	107
5.2.4	飞机复合材料蜂窝结构射线检测技术——以积水、损伤区检测为例	118
5.2.5	对零部件内部配合情况的射线检测	125
第6章	射线底片评定	129
6.1	底片评定	129
6.1.1	底片评定的主要内容与底片质量	129

6.1.2	评片的主要条件与要求	130
6.1.3	评片基本知识	131
6.2	飞机结构件缺陷识别	133
6.3	铸件常见缺陷识别	133
6.3.1	气孔	134
6.3.2	夹杂物	135
6.3.3	缩孔与缩松	136
6.3.4	疏松(显微缩松)	136
6.3.5	裂纹	137
6.3.6	冷隔	138
6.3.7	偏析	138
6.4	熔焊接头常见缺陷识别	139
6.4.1	未焊透	141
6.4.2	未熔合	141
6.4.3	裂纹	142
6.4.4	气孔	143
6.4.5	夹杂物	144
6.4.6	成形不良	145
6.5	复合材料构件与非金属材料制件的内部缺陷	146
6.6	底片上的其他影像	147
6.6.1	常见的伪缺陷	147
6.6.2	静电斑纹	148
第7章	射线检测的质量管理,工艺规程和检验报告	150
7.1	射线检测的质量概念	150
7.2	射线检测人员管理	150
7.2.1	技术培训与资格	150
7.2.2	健康	151
7.3	射线检测设备和器材管理	151
7.3.1	合格证明	151
7.3.2	维护	151
7.3.3	校验	151
7.4	射线检测质量控制	152
7.4.1	安全红灯安全性检验	153

7.4.2	胶片入厂检验	153
7.4.3	冲片性能检查	153
7.4.4	残留定影液浓度的测定方法*	153
7.5	射线检测工艺规程的一般要求	154
7.5.1	射线检测工艺规程基本概念及编制程序	154
7.5.2	射线检测工艺规程的主要内容	155
7.6	射线检测报告	157
7.6.1	底片的质量评定	158
7.6.2	质量分级评定的基本步骤	159
第8章	其他射线检验技术*	161
8.1	射线实时成像检测技术*	161
8.1.1	概述	161
8.1.2	射线实时成像检验系统	162
8.1.3	射线实时成像检验系统的图像和性能	166
8.1.4	射线实时成像检验的基本技术	169
8.2	中子射线照相检验技术*	171
8.2.1	概述	171
8.2.2	热中子射线照相检验技术	173
8.2.3	热中子射线照相技术的应用	176
8.3	射线CT检验技术*	177
8.3.1	概述	177
8.3.2	射线CT系统	178
8.3.3	CT图像重建原理理解	180
8.4	高能射线检验技术*	182
8.4.1	高能X射线的特点	182
8.4.2	高能X射线照相检验技术主要考虑的方面	182
8.5	CR技术*	186
第9章	射线检验安全防护	188
9.1	辐射量	188
9.1.1	照射量	188
9.1.2	吸收剂量	189
9.1.3	剂量当量	190

9.2 辐射生物效应	191
9.2.1 辐射生物效应分类	191
9.2.2 危险度、权重因子与有效剂量当量	192
9.2.3 辐射损伤	193
9.3 辐射防护原则、剂量限制体系和防护技术	195
9.3.1 辐射防护原则	195
9.3.2 剂量限制体系	195
9.3.3 外照射防护方法	196
9.4 辐射防护管理	197
9.4.1 辐射防护管理的一般规定	197
9.4.2 放射工作人员的基本条件与健康管理	198
9.5 辐射防护监测	199
9.5.1 辐射防护监测概述	199
9.5.2 比释动能概念	199
9.5.3 辐射防护监测的主要规定	200
第10章 射线检测实验*	202
10.1 实验1 X射线管的焦点尺寸测定*	202
10.1.1 实验方法和步骤	203
10.1.2 实验结果的分析评定	203
10.2 实验2 X射线的曝光曲线制作*	204
10.2.1 准备	205
10.2.2 实验方法和步骤	205
10.3 实验3 X射线胶片特性曲线制作实验*	206
10.3.1 工具器材的准备	206
10.3.2 实验方法与步骤	206
10.3.3 绘制胶片特性曲线	209
10.3.4 总结	209
10.4 实验4 飞机零件焊缝区的X射线检查*	209
10.4.1 器材准备	209
10.4.2 检测要求	209
10.4.3 透照	210
10.4.4 评片及填写试验报告	210
参考文献	211

第1章 绪论

1.1 射线检测的历史

X射线是在1895年由德国渥茨堡大学教授伦琴在研究阴极射线时发现的。他发现X射线可以穿透一本书或者薄铝片，并且可以在涂有铂氰化钡的屏幕上显示他的手的骨骼形状。他还拍下了第一张射线照片。

1896年，法国物理学家贝可勒尔在研究铀盐时发现使照相胶片感光的 γ 射线。

1898年居里夫妇提取出了镭。1900年前后，射线检测被应用到了医学领域。

1912年美国的D. 库利吉研制了带灯丝的阴极X射线管。

1930年射线检测正式进入了工业检测领域。1940年前后提出了射线照相检验底片质量的概念。在19世纪50年代中期提出了射线层析（CT）理论。

1962年前后，基本建立了完整的射线照相检验质量体系。

1970年以后图像增强器的出现推动了射线实时成像检验、射线CT和康普顿成像等的实现。

1990年，出现了数字化射线成像技术。

1.2 射线检测基本方法

射线检测是一种利用射线与物质的相互作用，检测材料或物质的组织结构中的不连续性的无损检测方法。

射线检测的基本方法如图1.1所示，一个可以产生X射线或者 γ 射线的放射源被放置在待检工件的一侧，而放射性检测设备被尽可能放置在靠近工件的另外一侧。在射线检测中常用的记录材料是胶片，而采用荧光屏的方法称为荧光屏检测法。

到达胶片的辐射由于穿过不同材质状况的材料时被吸收而不同。大量的辐射可以使胶片感光变黑。因此，如果穿过的材料较薄、密度低，射线底片较黑；相反，穿过的材料较厚、密度大，射线底片较白。

如果材料中存在缺陷，例如：裂纹、空腔、气孔等，射线底片影像会比较黑；如果在焊缝中有非金属夹杂时影像也会比较黑；但是如果其中有高密度材料夹杂（如钨）时，射线影像会比较亮一些。

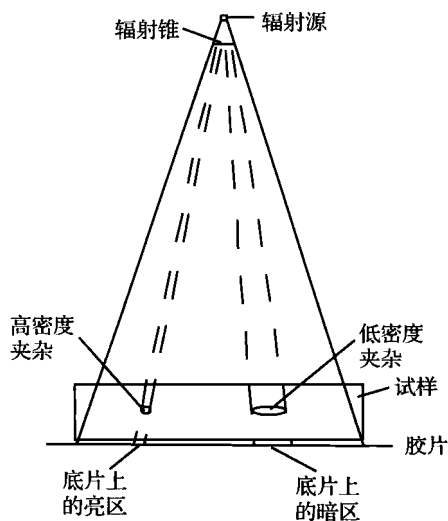


图 1.1 射线检测示意图

1.3 射线检测的种类

射线检测可分为以下几种：

- (1) 材料晶体结构分析（利用光的衍射）。
- (2) 材料化学成分分析（利用荧光射线或俄歇电子）。
- (3) 工业探伤（利用射线的吸收和散射）等。针对工业探伤有以下几种：
 - ①射线照相检验。
 - ②射线实时成像检验。
 - ③射线层析成像。
 - ④射线数字成像。

1.4 射线检测的优缺点

射线检测的优点如下：

- (1) 得到的底片可以长期保存。

- (2) 可以检测内部缺陷。
- (3) 容易检测体积性缺陷。
- (4) 能用于大多数材料。
- (5) 能检查安装的正确性。
- (6) 缺陷形象直观。
- (7) 荧光屏检测法可以给出一个实时影像。
- (8) 可在现场和原位检测。

射线检测的缺点如下：

- (1) 有放射性安全问题，对生物组织有伤害。
- (2) 对缺陷的方向性敏感，可能漏检平面型缺陷。
- (3) 检查裂纹能力有限。
- (4) 需要能接近部件的两侧。
- (5) 对于材料的厚度有限制。
- (6) 对射线底片的解释技术有很高的要求。
- (7) 是一种相对较慢的检测方法。
- (8) 成本较高。

第 2 章 射线检测的物理基础

物质以三种形式存在，即由元素构成的气体、液体或固体。元素不能通过化学方式被分解。自然界中有 92 种自然元素，如氧、碳、铅、铀。还有少量的元素是近年被人工合成的，这其中最有名的就是钷。化合物由不同比例的元素构成，如一个水分子由两个氢原子和一个氧原子构成。

2.1 原子结构*

1897 年前后，科学家们逐渐确定了电子的各种基本特性，并确认了电子是各种原子的共同组成部分。通常原子呈电中性，而既然一切原子中都带有带负电的电子，那么原子中就必然有带正电的物质。

1904 年，汤姆逊提出原子中的正电荷均匀地分布在一个大小等于整个原子的球体内，而带负电的电子则一粒粒地分布在球内的不同位置上，并分别以某种频率振动着，从而发出电磁辐射。这就是原子结构的钢球模型。

1911 年卢瑟福在他做散射实验的基础上，提出原子的中心是一个带正电的核，与整个原子的大小相比，核很小。电子围绕核转动，类似大行星绕太阳转动。这种模型叫做原子的核模型，又称行星模型（如图 2.1 所示）。

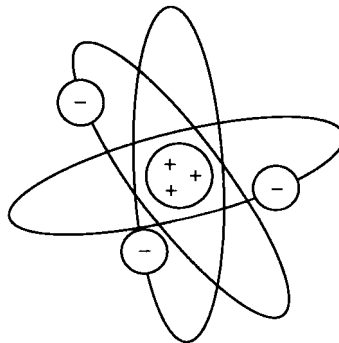


图 2.1 原子行星模型示意图

1931年玻尔的原子理论给出了这样的原子图像（如图2.2所示）：电子在一些特定的可能的轨道上绕核做圆周运动，离核越远，能量越高。当电子在这些可能的轨道上运动时，原子不发射也不吸收能量，只有当电子从一个轨道跃迁到另一个轨道时原子才发射或者吸收能量，而且发射或者吸收的辐射是单频的。辐射的频率和能量之间的关系由下式给出：

$$E = h\nu \quad (2-1)$$

式中， h ——普朗克常数，值为 $6.626 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$ ；

ν ——辐射频率(Hz)。

原子模型有以下特点：

- (1) 原子由带正电的原子核和绕核运动的电子组成，整个原子为电中性。
- (2) 绕核运动的电子只能沿满足一定条件的轨道运动，且不辐射能量。
- (3) 轨道电子具有一定能量，内层轨道电子能量低，外层能量高。
- (4) 电子符合从内层开始填充的规则，原子处于稳定状态。
- (5) 电子在不同轨道跃迁时，将发射或吸收光子；光子的能量为 $h\nu = E_n - E_m$ 。

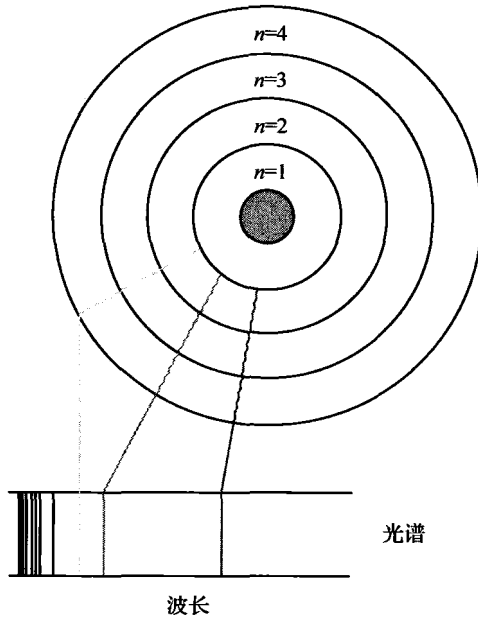


图 2.2 玻尔理论原子结构示意图