



# 维修差错导致的 民用航空事故案例 分析汇编

主编 李学仁 杜军 王红雷



国防工业出版社  
National Defense Industry Press

# 维修差错导致的民用航空 事故案例分析汇编

主编 李学仁 杜军 王红雷

国防工业出版社

· 北京 ·

## 内 容 简 介

不论是民航还是军航,维修差错都是导致航空事故的原因之一。为最大限度地降低维修差错导致的事故,需要对事故原因进行调查、分析,总结经验教训。本书通过列举 12 个因维修差错导致的民用航空事故案例,叙述事故经过及事故原因,并在此基础上从人为因素的角度对维修差错做进一步分析,找出导致维修差错的根本原因,提出安全建议,为航空管理人员、机务维修人员,以及其他参与航空维修领域活动的人员提供有价值的借鉴,亦可作为航空院校进行维修领域人为因素培训方面的教材。

### 图书在版编目(CIP)数据

维修差错导致的民用航空事故案例分析汇编/李学仁,  
杜军,王红雷主编. —北京:国防工业出版社, 2013. 1  
ISBN 978-7-118-08522-8

I. ①维... II. ①李...②杜...③王... III. ①民  
用飞机—维修—影响—飞行事故—案例—汇编—世界  
IV. ①V267②V328. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 281437 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

\*

开本 787×1092 1/16 印张 8 $\frac{3}{4}$  字数 199 千字

2013 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3500 册 定价 26.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

## 编委会名单

主编 李学仁 杜 军 王红雷

编译 (按汉语拼音排序)

黄海华 李健琚 李 祥 涂翠燕

王红雷 杨 琳 岳瑞军 张 晶

审校 王红雷

终审 杜 军

# 前 言

不论是军航还是民航,维修差错都是导致航空事故和事故征候的重要原因。除了威胁飞行安全外,对民用航空来说,维修差错还会造成航班延误、取消或改航,不仅给航空公司带来经济损失,而且还给旅客带来不便,也会造成直接或间接的经济损失。

为了预防因维修差错导致的事故和事故征候,减少维修差错带来的各种损失,我们需要最大限度地减少维修差错的发生,或者在维修差错发生后,最大限度地降低其后果的严重性。

从事故中总结、吸取经验教训,一直是各行各业藉以发展、进步的重要途径之一,对于航空维修业来说也不例外。通过对因维修差错导致的事故进行深层次的分析,我们可以了解维修差错产生的原因,从根源上采取有效措施加以控制。

鉴于此,本书精选了世界民用航空史上 12 个著名的因维修差错导致的事故,在叙述事故经过及分析事故原因的基础上,更从人为因素的角度对维修差错做了进一步分析,找出导致维修差错的根本原因,提出安全建议,为航空管理人员、机务维修人员,以及其他参与航空维修领域活动的人员提供有价值的借鉴。

本书中的 12 个案例是根据事故发生的时间,按照从前到后的顺序排列的,每个案例都分为事故叙述、事故调查、事故分析、维修差错分析,以及安全建议五个部分,内容来自于相关国家事故调查机构发布的事故调查报告,经编译人员翻译、整理而成。

本书主编李学仁:空军工程大学航空航天工程学院院长,教授,硕士导师,主要从事航空安全和检测技术研究;杜军:空军工程大学航空航天工程学院检测技术与状态监控教研室主任,副教授,硕士导师,主要从事飞行数据挖掘和分析工作;王红雷:中国民航科学技术研究院高级工程师,主要从事民用航空安全管理研究。

参加本书工作的人员还包括:“阿拉斯加航空公司 261 号航班空难”、“英国航空公司 BA5390 航班事故”和“中西航空公司 5481 航班空难”由中国民航科学技术研究院(简称航科院)李健琚编译,“大西洋东南航空公司 ASE529 号航班空难”和“大陆快线航空公司 2574 号航班空难”由航科院杨琳编译,“阿罗哈航空公司 243 航班事故”和“越洋航空公司 TSC236 航班事故”由汕头航空公司岳瑞军编译,“美国航空公司 191 航班空难”和“中华航空公司 CI611 航班空难”由航科院王红雷编译,“太阳神航空公司 HCY522 航班空难”由航科院张晶编译,“亚当航空公司 DHI574 航班空难”由航科院李祥编译,“日本航空公司 123 航班空难”由浙江越秀外国语学院涂翠燕和北京工商大学嘉华学院黄海华编译。本书概述中的部分内容来自于澳大利亚运输安全局的一份航空研究、分析报告,由王红雷编写、编译。本书由王红雷审校,杜军终审。

许多事故调查报告篇幅都在上百页,为了将其浓缩成一万字左右的事例案例,编译者要在对整个报告内容总体把握的基础上,对相关内容做出取舍、编排和编译,为此,不仅要求编译者具有较高的英语阅读水平,还要有较高的文章编辑、组织能力。在此,我们向本书的编译人员和其他给予本书帮助和支持的人员表示由衷的感谢,由于他们的努力,这些世界著名的航空事故案例才得以与中国读者见面。

由于编译人员水平有限,书中难免有不足之处,敬请读者提出宝贵的批评、指正意见。

空军工程大学航空航天工程学院

# 目 录

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 概述 .....                     | 1   |
| 美国航空公司 191 航班空难 .....        | 8   |
| 日本航空公司 123 航班空难 .....        | 18  |
| 阿罗哈航空公司 243 航班事故 .....       | 30  |
| 英国航空公司 BA5390 航班事故 .....     | 40  |
| 大陆快线航空公司 2574 号航班空难 .....    | 50  |
| 大西洋东南航空公司 ASE529 号航班空难 ..... | 59  |
| 阿拉斯加航空公司 261 号航班空难 .....     | 69  |
| 越洋航空公司 TSC236 航班事故 .....     | 82  |
| 中华航空公司 CI611 航班空难 .....      | 93  |
| 中西航空公司 5481 航班空难 .....       | 102 |
| 太阳神航空公司 HCY522 航班空难 .....    | 114 |
| 亚当航空公司 DHI574 航班空难 .....     | 124 |
| 参考文献 .....                   | 134 |

# 概 述

1903 年 12 月 17 日,美国莱特兄弟实现了人类历史上第一次动力飞行。伴随着航空器的诞生,与之密不可分航空维修业应运而生,至今已有近 110 年的历史了。

航空维修是指对航空器或者其部件所进行的任何检测、修理、排故、定期检修、翻修和改装工作,其目的是使航空器持续满足型号设计和运行规章中提出的技术标准要求,保证安全运行。

维修费用是航空公司面临的成本之一,有人估算过,航空器每飞行 1 小时,要有 12 人工小时的维修工作发生。没有维修人员的付出,航空器及其部件将处于不可靠的水平,将会威胁运行安全和效率。

虽然维修对保持系统可靠性做出了至关重要的贡献,但是维修也是造成系统失效的一个主要原因。有证据表明,因维修导致的事故在航空事故中的比例越来越大。2003 年《国际飞行》杂志报告称,“维修差错导致技术设备失效”成为航空公司事故和人员死亡的首要原因,超过了可控飞行撞地这一曾经是导致事故发生的最主要原因。

除了威胁飞行安全,维修差错还会造成航班延误、取消、改航,以及打乱运行计划,从而显著增加财务费用。举例来说,据波音公司 2008 年的统计,一架波音 747-400 飞机取消航班会给航空公司带来高达 14 万美元的损失,延误的平均损失为 1.7 万美元。甚至仅仅因为起落架上一个小小的销钉未拔,飞机不得不滑回登机门,就会造成很大的经济损失。

维修差错是指维修人员未按要求或最佳做法执行维修任务,是维修过程中的人为差错,是维修领域中的人为因素问题。

随着自动化系统越来越普及,人类对设备和系统实施直接手工控制的机会越来越少。但是航空维修工作却因其性质成为人类与技术设备之间直接接触的一个主要保留点,人类的能力与局限性会通过这个点对系统的安全性和可靠性产生重大影响。因此,为了提高航空安全性和可靠性,我们需要比以往更加了解人为因素在航空维修中的作用。

根据澳大利亚运输安全局的研究,通常,事故或事故征候由运行人员,比如飞行员或维修人员的个人行为触发,但是个人行为却与其他要素,包括组织、当地条件,以及风险控制密切相关。为了查清事故原因,从而预防其发生,我们有必要沿着链条向回查看系统中的所有要素,对事故的根本原因进行分析。

## 1. 个人行为

人为差错可用两种方法描述:物理描述和心理描述。

物理描述包括:

- (1) 遗忘,即未能执行某个必要的动作,比如未固定滑油口盖。
- (2) 犯错,即执行了本不应执行的动作,比如将线缆交叉连接。
- (3) 时间和精度,即在错误的时间、按错误的顺序,或未按必需的精度执行某个动作,

比如使用错误设置的扭力扳手。

心理描述包括：

(1) 认知差错,即未能发现本应发现的某个关键项目,比如一个破损的轮胎、金属结构上的裂纹,或者拖飞机时前方的障碍物。

(2) 记忆误差,最常见的是遗忘,但忘记的不是过去的事,而是忘记执行本打算执行的某个动作,比如工作结束时忘记重新连上某个断开的系统,或者没有固定滑油口盖。

(3) 疏忽,即在不当的时间或地点心不在焉地执行某个熟悉的技术动作,这通常发生在执行像检查气压、开关整流罩这样的例行工作时。比如用抹布擦拭滑油,结果抹布被吸入发动机造成外来物损伤,再比如维修人员下意识地在工作单上签字。

(4) 错误假设,即对一个熟悉的情况产生错误的认识,并且未能发现其认识是错误的,通常发生在与其他同事一起工作时,错误地认为别人将要执行某一步工作。比如一名负责电气的机务人员可能认为其他同事已经断开了电源,因为平常都是这么做的。

(5) 技术误解,即维修人员不具备必要的知识,或者不知道去何处了解所需信息,通常发生在执行不熟悉的任务时。

(6) 违规,这种差错在维修领域广泛存在,比如许多人都曾在工作未完成时在工作单上先签字,或者未使用正确的工具或设备完成任务。

违规还分为日常违规和特殊情况违规。前者是每天都发生的违规行为,几乎成为正常工作方式的一部分,比如在机场里驾车超速行驶。管理层通常知道日常发生的违规行为,但是一般都能容忍,因为觉得能提高工作效率。特殊情况违规不像前者那么常见,通常是对异常情况做出的反应,目的是为了能让工作能继续下去。特殊情况违规最常见的原因是管理上的压力,比如因飞机要尽快投入运营带来的时间压力。

维修人员违规是航空业面临的最难解决的人为因素问题,维修人员在执行任务时经常面对着双重标准。一方面,他们希望遵守繁多的要求和程序,但另一方面,公司希望他们快速、高效地完成任务。

## 2. 当地条件

导致维修差错的个人行为常常反映出工作场所当时的条件,准确识别差错性质与当地条件之间的关系,可以对当地条件加以改进,这是系统改进的重要一步。频繁导致差错发生的当地条件包括:

(1) 时间压力。航空器延误会给运营人带来巨大的经济损失,所以大量维修工作的实施都是有时间限制的。虽然时间压力在航空器运营中是不可避免的,但是维修人员常常觉得很难应对航班计划和维修计划带来的压力。

时间压力可能导致记忆误差和违规之类的差错发生,比如机务人员为了保证航班正常起飞赶时间,不完全按程序要求执行,而是跳过几步程序。本书中越洋航空公司 TSC236 航班事故就是一个典型的例子。当时,距离维修任务的计划完成时间还有不到半天时间,为了不影响执行航班任务,按时完成发动机更换工作,机务人员被迫决定在新换的发动机上使用了不匹配的液压泵和燃油管。结果造成管路之间空隙过小,相互接触、摩擦,导致燃油管破裂漏油,飞机飞行中所有发动机熄火。幸好机长采取滑翔飞行技术成功着陆,才避免了一场灾难性事故。

(2) 维修程序和文件。航空器维修非常倚重书面程序。根据 FAA 的调查数据,航空

维修人员花在维修文件上的时间占其工作时间的 25% ~ 40%。质量差的维修程序一般会导致维修人员发生记忆误差、技术误解和违规等差错。

说到维修手册、结构修理手册,以及其他文件,例如最低设备清单,其主要问题并不只是内容不准确或存在技术错误。对美国维修技术人员的调查发现,这些文件还存在其他许多问题,比如:手册中的程序描述过于简单,程序执行起来困难。许多人都要找其他同事讨论、咨询,或者干脆摸索一套自己的方法。程序缺乏可操作性是导致违规最常见的原因。在欧洲的航空公司里,导致违规的首要原因是维修人员自己的程序比正规程序简单、快捷,或者程序描述模糊不清。

想要填补维修文件技术编写人员与执行程序的维修人员之间的鸿沟,方法是有的。比如在编写程序时,将任务实际执行一遍,把每一步记录下来,就是一个具有可操作性的程序。这个做法可能是组织层面上最有用的人为因素干预方法。

(3) 合作。极少有维修人员能单枪匹马完成一项工作,因为为了确保顺利完成任务,他们必须与其他人员协调。协调问题,例如误解、无效沟通,以及错误假设在维修事故和事故征候中屡见不鲜。美联航的一项调查显示,工程维修主管们认为,沟通和人际交往技巧问题对工作有效性来说是最重要的。

无效沟通有时是因为环境太嘈杂,但也可能因为其他沟通障碍,比如表述不清,或者缺少聆听技巧。还有相当大一部分沟通不是通过语言表达,而是通过身体语言或者语调完成的。但是在某些情况下,特别是有时间压力或心理压力的情况下,我们所看到的或听到的只是我们希望看到或听到的,而不是实际发生的。

(4) 交接班。许多维修任务,尤其是大修任务不可能在一班内完成,维修人员经常会从上一班同事手里接收工作,再将本班未完成的工作交给下一班。这就需要信息在班组之间准确、有效的传递,况且有许多时候交接班不是面对面进行的,确保信息准备、有效传递是维修工作的一个重要方面。

交接班中产生的差错可能导致非常严重的后果,就像本书中介绍的发生于 1991 年 9 月 11 日的大陆快线航空公司 2574 号航班空难一样,造成机上 14 人全部死亡。事故前晚,维修人员在对这架 EMB120 飞机执行维修任务时需要拆除左侧水平安定面前缘上部的固定螺钉。然而换班时工作还未完成,书面交接班记录中也没有说明螺钉尚未重新安装上。下一班维修人员在不知情的情况下签字放行了飞机,导致左水平安定面前缘在空中与机身脱离。

对于交接班,人们关注的重点通常集中在上一班向下一班的信息传递上,但是实际上,交接班还是一个审视工作进展情况,发现和纠正差错的好时机。

与班组长之间交接相比,由实际参与工作的人员面对面交接可以避免遗漏信息。面对面交接班在诸如核电站、海上石油开采、空中交通管制等许多高危行业中是标准操作程序。

(5) 疲劳。疲劳可能表现为因长时间集中精力执行任务而导致的身体疲倦,情绪耗尽,技能下降,长期缺少充足的睡眠还会导致慢性疲劳。睡眠产生于两个原因,一是睡眠缺失,二是 24 小时昼夜节律对人类行为表现的影响。人类的行为表现有许多方面在凌晨的时候是处于低谷的,记忆力和反应时间在 4 点左右是最差的,这时差错也最容易出现。也就是说,夜班比白班产生维修差错的风险要大。

研究发现,维修人员困倦时,容易产生意图类的如记忆误差这样的差错,不太容易产生思考类的如程序误解这样的差错。

(6) 缺乏系统知识。澳大利亚的一项研究表明,因维修人员缺少培训或系统知识导致的不安全事件占总数的12%。虽然培训多半针对未取得或新取得执照的人员,但一些持照的、经验丰富的维修人员也会因缺乏知识、技能或经验而产生差错。

(7) 设备缺陷。地面设备问题,例如缺少专用工具或工作台,常常出现在维修差错致因中。例如本书中介绍的发生于1990年6月10日的BA5390航班事故。负责安装风挡玻璃的维修人员在执行任务时使用了不适当的工作台架,而且无法得到适合的扭力扳手安装风挡螺栓。有些时候,设备问题还会对维修人员自身的安全造成威胁。

(8) 设计缺少可维修性。虽然维修人员很少有机会对他们所维修的系统在设计上产生影响,但是设计问题确实是导致维修差错的一个主要因素。这些设计问题包括:

- ① 难以够到的部件,尤其是为了够到某个部件必须断开其他不相干的部件;
- ② 障碍物遮挡视线;
- ③ 程序执行起来需要很高的精度,或者需要施加难以达到的力度;
- ④ 紧挨着的几个系统难以相互区分;
- ⑤ 几行看上去差不多的控制元件,增加了相互混淆的概率;
- ⑥ 系统有多个模式,但是没有明确是何种模式;
- ⑦ 仪表提供误导信息;
- ⑧ 管路连接或电气连接可以被交叉连接,或容易连接到错误的系统上;
- ⑨ 部件可以被反向安装。

美国国防部认为,在可维护性方面有以下几个关键问题:

① 力量限制:维修人员在体力上能否实现对目标的搬运、举起、保持住、拧紧、推动或拉动?

② 目标接近难度:接近工作区的难易程度如何?

③ 目视观察:工作区能否被直接观察到,还是得凭感觉或借助镜子之类的工具?

本书中的美国航空公司191航班空难就是由于设计问题,造成更换发动机吊架前、后隔框球形轴承的工作执行困难,导致发动机吊架结构在维修过程中损伤,飞机起飞时发动机脱落,飞机坠毁,机上271人全部遇难。

### 3. 风险控制

在维修领域中,对维修差错一般有两类风险控制方法:预防性控制和恢复性控制。

(1) 预防性风险控制是为了减少人为差错发生的机会,举例来说,比如在部件设计时就考虑到防止不正确安装,或者在装配销钉上加荧光条,减少忘记拔销钉的机会。另外,像加强培训、人员资格审定也属于预防性风险控制。

(2) 恢复性风险控制是为了发现已经开始发展的危险情况并将其纠正过来。比如通过功能性检查和重复检查来发现维修差错,就是一种程序上的恢复性风险控制。

有些方法不一定很正式,但是能发现差错。比如,对口头指令的复诵,通过重复口头指令可以减少沟通差错。

有一些风险控制方法是为了最大限度降低差错的后果。例如专门用于双发延程运行(ETOPS)的维修注意事项就是这样的方法。当航空器按照ETOPS程序维护时,对关键系

统的多个元件要尽可能不采用相同的维护措施。像 B-737、B-767 的发动机、燃油系统、灭火系统,以及电源都是 ETOPS 关键系统,尽可能不采用相同的维护措施是为了避免同样的维修差错在多个系统出现,对多个冗余系统产生影响。

#### 4. 组织

虽然维修差错一般是个人导致的,但是调查显示,其中存在组织层面的原因,诸如:人员培训和资格审定,资源配置,组织文化和价值观。举例来说,一个违规行为,比如使用不正确的工具,可能是因为没有正确的工具,它反映的是设备购置方面的政策或者财务问题。最常见的违规原因是时间压力,它实际上反映的是组织层面在计划、人员配备,或者工作安排等方面存在问题。

承认组织对维修差错的产生具有一定的影响,并不等于免除了维修人员的责任,或者将维修人员的错误一味归咎于管理层。然而,虽然维修差错通常由个人导致,但是要解决问题还是需要从系统层面采取方法。

从组织层面应对维修差错包含两部分内容。第一,通过发现并消除差错滋生的条件,最大程度降低维修差错发生的可能性。应对措施通常包括:疲劳管理,人为因素培训,提供适当的工具和设备,以及其他从人为因素角度直接与维修差错相关的措施。第二,必须认识到维修差错只可能减少,不可能消除。组织应当学会像应对自然灾害那样管理维修差错。面对维修差错,组织一方面通过适当的风险控制措施发现并纠正差错,另一方面最大限度地减小尚未被发现的差错可能造成的后果。

了解了个人行为、当地条件、风险控制,以及组织与维修差错的关系,我们需要对维修差错进行风险管理。

(1) 差错管理系统。目前,航空公司越来越重视差错管理,已成为组织内部安全管理体系(SMS)不可分割的一部分。但是,维修部门面对的一个重要问题是如何鼓励个人报告那些尚不为管理层所知的维修差错。虽然维修工作也要做大量记录,但是管理层对维修人员的情况肯定不如对飞行员和管制员那么了解。因为飞行员的情况可以通过快速存取记录器、驾驶舱语音记录器和飞行数据记录器加以检查,管制员的情况也受到密切监督,而且一旦出现差错会立刻显现出来。相比之下,如果一名于凌晨在偏远地区机库里执行维修任务的维修人员遇到程序上的问题,那么这个问题在组织层面上可能永远不为人知,除非他主动报告。所以,一旦发生维修差错,等它被暴露出来,可能要好几年的时间,而到那个时候,要确定它是怎么发生的就很困难了。

对于组织来说,要发现维修领域在组织层面的问题,除了通过差错报告以外,基本上没有什么别的渠道,但是从全世界的情况来看,基本上都不鼓励维修差错公开报告。这是因为组织对维修差错采取的措施多半是处罚性的。在有些公司,对于像是忘记固定好滑油加油口盖这类常见差错,处罚措施可能动辄就是扣发几天的工资,甚至弄不好被立即炒鱿鱼。所以,许多维修差错被隐瞒下来一点儿也不奇怪。

虽然与航空安全相关的每个人都必须对自己的行为负责,但是对差错采取处罚性的措施一定是适得其反的。为此,有些航空企业为了鼓励报告,提出了“不惩罚”文化,但这意味着人们不用对自己的行为负责。近些年来,一种“公正文化”的概念流行起来,在这种文化下,只有个别极端违规行为才会受到惩处,其余都不会。

(2) 维修差错报告。差错报告系统正在向着确保维修人员毫无顾虑地报告其所犯错

误的方向推进。欧洲航空安全局的规章 145 部要求,维修单位要建立一套内部不安全事件报告机制,确保不安全事件能够被报告并得到分析。在欧洲航空安全局发布该规定之前,2001 年,英国民航局发布的第 71 号适航公告概述了维修差错管理的最佳做法,其中包括公司承诺、明确的处罚政策,以及事件调查程序。加拿大运输部也颁布了规章,要求航空公司建立 SMS,其中包括差错和其他问题报告,以及对这类事件的内部调查和分析。美国联邦航空局鼓励航空公司和维修单位引入航空安全行动计划(ASAP),该计划侧重于对报告的安全问题采取纠正措施,而不是处罚。按照这个计划,上报的问题由事件审查委员会负责审查,委员会由联邦航空局人员、管理层和工会代表组成,目的是确保公正。

(3) 人为因素培训。人为因素培训从 20 世纪 70 年代便开始了,但主要是针对飞行机组的。到 20 世纪 90 年代,美国兴起了第一波维修人为因素培训——维修资源管理(MRM)热潮。它以机组资源管理为蓝本,内容包括建立自信、管理各种压力、决策、沟通技巧、冲突解决方法等,除了从态度上帮助维修人员转变外,还为他们提供在工作场所实际可用的技巧。

在国际民航组织、欧洲航空安全局和加拿大运输部提出维修人员掌握人为因素知识的要求后,全世界掀起了第二波维修人为因素培训热潮。欧洲航空安全局第 66 部列出了人为因素各项原则,推荐的课程包括:合作、在时间压力下工作、沟通,以及人为差错的管理等。欧洲航空安全局第 145 部要求,维修单位的人为因素培训不仅针对维修人员,还要针对经理、主管、质量控制人员、航材库管理人员等,持续培训每两年一次。145 部指南材料中还列出了 60 多个人为因素主题,包括:违规、记忆的局限性、工作压力管理、合作、自信,以及处罚政策。澳大利亚民航安全局新出台的 145 部对维修单位及个人也有类似的要求。

(4) 从事件中吸取经验教训。通常,意外情况表面现象的背后都有深层次的根本原因,因此只处理表面现象很难解决实质问题,而且可能会使情况恶化。例如,对于一个日常维护中经常忽略的程序,如果该程序根本没必要存在或者有缺陷,那么硬要遵照执行反而可能弊大于利。所以说,要想持续改进,就需要从深层次入手,查找根本原因并加以解决。

为了找到组织层面的根本原因,对一个因维修差错导致的意外事件,我们应当多问几个“为什么?”比如:为什么会出现这样的行为?为什么风险控制失效?为什么会存在这样的影响因素?这样一路问下去,会找到组织层面的根本原因,对提高安全和质量具有强大的和广泛的影响。

(5) 不安全事件调查系统。近年来,针对航空维修领域的调查技术取得了长足进展。最早的技术像波音公司的维修差错判断辅助工具(MEDA)列出了许多差错描述,例如“检修口未关闭”,并引导调查人员确定影响因素。影响因素有 70 多个,包括疲劳、知识不足、时间压力等,但是没有差错的心理描述。

欧洲开发了航空器签派和维修安全系统(ADAMS),其中也包括大量维修差错类型,且还有大量心理描述,影响因素将近 100 个。

美国空军在 Reason 模型的基础上开发了人为因素分析和分类系统(HFACS),美国海军将 HFACS 运用到维修领域,成为 HFACS-ME,用于维修领域事故征候分析。HFACS-ME 共有 25 种导致维修差错的潜在条件,并强调监管因素。

上述系统化、结构性的调查系统具有两大优势。其一,这种系统就像检查单,通过提示,帮助调查人员查找被掩盖住的问题,从而提高调查有效性。其二,长期使用后,系统中会积累大量的事故征候数据,不仅便于趋势分析,还可能发现某些不相关的数据之间的联系。

综上所述,航空业离不开维修人员的贡献,然而维修差错对航空安全来说是一个重要且持续的威胁。过去,维修差错只会招来处罚,现在,全世界都认识到维修差错反映的是人、工作场所和组织因素之间的相互作用。虽然维修人员依然必须对其行为负责,但是维修差错的管理需要从组织层面采取应对措施。

## 美国航空公司 191 航班空难

1979 年 5 月 25 日 15 点 04 分,一架美国航空公司的 DC-10-10 飞机执行 191 航班任务,在伊利诺伊州芝加哥奥黑尔机场起飞后不久坠毁,机上 271 人全部遇难,另有地面 2 人遇难,2 人受伤。

### 1. 事故叙述

1979 年 5 月 25 日,美国航空公司一架登记号为 N110AA 的 DC-10-10 飞机执行 191 航班任务。191 航班是一个常规定期旅客航班,始发地是伊利诺伊州芝加哥奥黑尔国际机场,目的地是加利福尼亚州的洛杉矶。机上共 258 名旅客和 13 名机组成员。美国中央夏令时间 14 点 59 分,飞机滑离登机门。机务维修人员监控了发动机的启动过程、飞机推出过程,直至飞机开始滑行。整个过程均未发现任何异常情况。

奥黑尔机场当时的气象条件很好,天空晴朗,地面风向 020°,风速 22kn。191 航班得到机场空管塔台许可,从 32 右(32R)跑道起飞。公司的起飞数据卡显示,当时飞机水平安定面配平设定为 5°,机头向上,起飞襟翼设定为 10°,起飞总重量为 379000 磅(1 磅 = 0.45 千克)。低压压缩机目标转速( $N_1$ )设定为 99.4%,关键发动机失效速度( $V_1$ )为 139KIAS(节指示空速),滑跑速度( $V_R$ )为 145 KIAS,起飞安全速度( $V_2$ )为 153 KIAS。

机场塔台发出许可,要求 191 航班滑行至 32R 跑道的等待位置等候起飞。15 点 02 分 38 秒,191 航班接到起飞许可。15 点 02 分 46 秒,机长对许可进行确认:“美国航空公司 191 航班准备起飞。”

191 航班起飞滑跑阶段一切正常,但是突然间,悲剧发生了。飞机的左侧发动机(或者称为 1 号发动机)及吊架结构从机身上脱落下来。目击者称,他们看到飞机在起飞滑跑过程中有一股白色的烟雾从 1 号发动机的吊架处冒出,紧接着 1 号发动机及吊架突然从机身上脱落,并向上飞起,越过机翼后砸在跑道上。随后,飞机拉出一条由泄漏的燃油和液压油形成的雾化尾迹。飞机离地后继续沿 32R 跑道方向飞行并开始爬升,爬升过程中机翼保持平衡状态,直到飞出 6000 英尺(1 英尺 $\approx$ 0.30 米),离地高度 300 英尺。之后不久,飞机开始向左滚转,机头下俯,机身开始下沉。在飞机下沉的过程中,机翼继续向左侧滚转,最后超过了垂直位。

191 航班坠毁在一片开阔地上,这里有一个拖车停车场,位于 32R 跑道起飞端西北方向 4600 英尺处。由于在撞击中爆炸、起火,飞机完全损毁。机上 258 名旅客、13 名机组人员,共计 271 人全部遇难。事故还造成地面 2 人遇难,另有 2 人二度烧伤和三度烧伤。此外,事故还损毁了一个老机库、几辆机动车,以及一个活动房车。

该架飞机于 15 点 04 分坠毁,当时是白天,坠机地点位于北纬 42°0'35",西经 87°55'45"。

这架登记号为 N110AA 的 DC-10-10 飞机由美国航空公司所有并运营,发动机型号为通用电器(GE)公司 CF6-6D。根据制造厂的数据,左发重 11512 磅,吊架重 1865

磅,整个发动机—吊架组件重量总计为 13477 磅。由于失去发动机、吊架机构,飞机重心向后移动了两个百分点,大约为 22% MAC(平均空气动力弦长)。后移的重心仍然位于前重心(16.4% MAC)和后重心(30.8% MAC)限制范围之内。侧向重心右移了 11.9 英寸(1 英寸=2.54 厘米)。

## 2. 事故调查

191 航班事故调查工作由美国运输安全委员会(NTSB)负责。

### 1) 现场调查

191 航班是以左机翼和机头均朝下的姿态撞击地面的。左机翼翼尖最先触地,飞机爆炸并解体。飞机碎片散落在一片开阔地和一个拖车停车场上。由于飞机结构碎裂得太厉害,因此除了在 32R 跑道右侧找到的 1 号发动机吊架外,残骸现场几乎找不到什么有用的线索。

1 号发动机及吊架在跑道上触地的痕迹最早出现在距 32R 跑道东南端大约 6953 英尺、距跑道中心线大约 19 英尺的地方。发动机及吊架结构的其他部分均位于这一区域。

该吊架原本是通过位于三个不同结构件上的多个球形接头与机翼连接在一起的。第一个连接点有两个球形接头,它们位于与机翼前梁前端的机翼结构相连的吊架前隔框上,这两个接头是上、下对齐的。第二个连接点也有两个球形接头,其中一个位于吊架前隔框的背面,另一个球形接头将推力连杆与机翼下表面相连。第三个连接点是一个位于吊架后隔框上的球形接头,它通过与安装在机翼下部的一个 U 形接头相连,从而将吊架与机翼连在一起。吊架后隔框安装边的一部分尚连在从机翼脱落下来的 1 号发动机吊架上。

调查人员在残骸中找到了吊架后隔框上部的三分之二部分,这部分从围绕其周边的安装边上脱离下来。后隔框顶部的两个接耳脱落,其后侧靠近机翼下缘 U 形接头的部位有严重割痕。机翼 U 形接头还连接在机翼上,吊架后隔框球形轴承仍与 U 形接头连接着,脱落下来的那两个后隔框接耳也在球形轴承的顶部找到了。

2 号和 3 号发动机均位于飞机主残骸上。从发动机损坏的情况可以看出,撞击地面时,这两台发动机均处于高速运转状态。这三台发动机之后都被送往美国航空公司位于俄克拉荷马州塔尔萨(Tulsa)的维修基地,拆开后进行仔细检查。经查没有发现这三台发动机在事故发生前存在故障。

此外,调查人员还确认了在撞击地面时飞机的其他一些情况:起落架处于放下并锁定位置;安定面所处位置为机头向上 5.71°;液压系统无任何内部运行问题,2-1 不可逆马达泵处于开位,表明 1 号液压系统泵由 2 号液压系统驱动;所有 8 个襟翼作动筒都恢复原位,后缘襟翼位置经与其他同型号飞机比较后确定为伸出 10°;一块长 3 英寸、刚好位于吊架前端与机翼连接点前部的左机翼前缘部分在发动机—吊架组件与飞机脱离时被撕掉;左机翼外侧缝翼驱动作动器的 1 号和 3 号液压系统的伸出和收回液压管路以及反馈电缆被切断;左机翼外侧缝翼收起,而内侧缝翼及右机翼内侧和外侧缝翼均伸出,位于起飞位。

另外,对驾驶舱仪表的检查没有发现任何对事故调查有用的信息。

### 2) 测试和分析

(1) 金相分析。N110AA 机的吊架后隔框被送往 NTSB 的金相实验室做进一步检查。检查发现,前、上安装边存在一处断裂。其中较大的那部分正好位于安装边与隔框前壁之

间径向方向上,长度 10 英寸,方向从内到外。断裂特征呈现出典型的过载断裂迹象。从断口上的人字纹和撕裂棱线来看,断裂的过程是从安装边的中心开始,先向下,之后向内侧及外侧延伸。断口的底部呈现出由弯曲断裂所致的挤压产生的擦伤。这种擦伤状态在上安装边较薄的中心部位分布较广,大约有 6 英寸长,但是在断裂的外侧端则分布较少。这个 10 英寸长的断裂是由于过应力造成的,而过应力是由一个位于安装边中心、刚好在断裂面前部的向下弯曲力矩引起的。

断裂的两端都发现了疲劳裂纹。位于内侧端的疲劳裂纹先是向内、后方发展,之后向内、下方发展,一直发展到连接隔框前、后两部分的上、内紧固件处。外侧端的疲劳裂纹向着上安装边最前方外侧孔的方向蔓延。过应力断裂和所有疲劳裂纹的长度总和为 13 英寸。

上安装边的后断裂面上有一个月牙状变形,其形状与机翼下缘的 U 形接头形状一致,像是遭到过机翼 U 形接头的撞击。

(2) 应力测试。由于在上安装边上发现了损伤情况,因此调查人员打算通过实验室测试确定产生 10 英寸过载裂纹所需的载荷。实验结果显示,当载荷加到 6400 磅时,安装边上开始出现裂纹,最初的长度为 1.1 英寸,且安装边偏转了 0.122 英寸。当加载至 7850 磅时,安装边偏转 0.2 英寸,裂纹增长到 2.8 英寸。再稍加载荷,裂纹贯穿安装边。加载到 16000 磅时,裂纹达到 10 英寸。在另一个实验中,对安装边上原有的长 6 英寸的裂纹加载推力载荷,当推力载荷达到 11625 磅时,裂纹达到 10 英寸。

(3) 数字飞行数据记录器(DFDR)译码。DFDR 记录了 50s 的起飞滑跑数据和 31s 的空中数据,数据显示起飞时飞机构型设置正常。

(4) 照片分析。191 航班起飞时刚好有两人拍下了一共五张照片,分别是候机楼和另一架正在五边进近的 DC-10 上拍摄的。通过辨认,照片中的飞机形态与 DFDR 记录的基本一致。

(5) 风洞实验。风洞实验在美国国家航空航天局进行,用于测定 DC-10 飞机在失去左发及吊架情况下的气动特性,计算在此情况下飞机的失速速度等数据。另外,对失去 1 号液压系统会对飞机控制能力产生什么影响也做了分析和计算。

(6) 模拟机测试。参加模拟机测试的共有 13 名飞行员,模拟机按照 191 航班起飞时左发及吊架脱落的情况设置,共进行了 70 次起飞模拟测试。飞行员们表示,他们从驾驶舱里无法看到 1 号发动机和左机翼,因此只能通过警告发现问题。而警告出现时飞机应当已经开始滚转了,因此飞行员来不及采取任何措施将飞机从失速中改出。

### 3) 维修情况调查

飞机制造商麦道公司曾于 1975 年 3 月 31 日和 1978 年 2 月 1 日发出过两个服务通告,编号分别为 54-48 和 54-49。54-48 要求更换吊架后隔框球形轴承,54-49 要求更换吊架前隔框上、下球形轴承。服务通告要求按照 DC-10 维修手册 54-00-00 中的程序拆卸吊架,即按照先拆下发动机,然后再拆吊架的顺序,并建议在执行 1、3 号发动机拆卸任务时完成此服务通告。但是美国航空公司认为这样做不切实际,因为他们无法准确预计何时需要拆卸发动机,如果要等到拆卸发动机时执行该服务通告,则不知道要等到什么时候。况且航空公司也不必非要按照制造厂的建议行事。于是,美国航空公司决定在执行 C 检时完成这两个服务通告,并于 1978 年 7 月 28 日就此发布了工程更改指令