

全国第五届航空航天 装备失效分析会议论文集 (2006年)

张 栋 主编



国防工业出版社

National Defense Industry Press

全国第五届航空航天 装备失效分析会议论文集

(2006 年)

张 栋 主编

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

全国第五届航空航天装备失效分析会议论文集/张栋
主编. —北京: 国防工业出版社, 2006.4

ISBN 7-118-04394-X

I. 全... II. 张... III. ①航空—装备—失效分析
—文集②航天—装备—失效分析—文集

IV. V216.3-53②V416.3-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 016370 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 100044)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 34½ 字数 885 千字

2006 年 4 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—1250 册 定价 100.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

全国第五届航空航天装备失效分析研讨会

2006·宁波

会议主办单位

中国航空学会
中国人民解放军空军装备部
国防科学技术工业委员会
中国民用航空总局

会议承办单位

空军飞行事故和失效分析中心

会议协办单位

中国航空工业第一集团公司北京航空材料研究院
中国航天科技集团航天材料及工艺研究所
中国民用航空总局安全技术中心
海军航空工程应用所
北京普瑞赛司仪器有限公司（ZEISS 材料显微镜中国总代理）

会议支持单位

励精科技（上海）有限公司
元中光学仪器国际贸易（上海）有限公司
美国热电北京办事处
中国人民解放军第 5713 工厂
中国人民解放军第 5719 工厂
徐州豪立电子有限公司
科视达（中国）有限公司
北京恒一企业有限公司

会议组织委员会

主 任 吴学仁

副主任 何 涛 常 洪 江 军

委 员 (按姓氏笔画)

巩树庭 李锦华 张 栋 张卫方 姚红宇

禹泽民 柴志刚 傅国如

会议论文编辑委员会

主 任 张 栋

副主任 姚红宇 张卫方 刘春立

委 员 (按姓氏笔画)

习年生 马海涛 王红英 史 刚 刘庆琼

朱立群 李 权 李旭东 李甯然 苒照顺

陈 荣 陈跃良 姚 戈 禹泽民 胡祥松

赵四辈 钟培道 徐志刚 徐肖豪 柴志刚

莫铁根 陶春虎 常 青 黄 明 龚晓宇

谢明立 韩 露 臧启山

主 编 张 栋

副主编 柴志刚 陈 荣

前 言

纵观历史，材料是一切产品的物质基础，失效伴随产品已有几千年的历史，古代说不上失效分析，避免产品缺陷往往作为工匠中零星、分散、宏观的经验秘诀，世代相传。以蒸汽动力和机械生产为代表的工业革命为社会提供众多廉价产品，但也带来不少灾难，失效分析（故障诊断）开始作为仲裁产品丧失规定功能和提高产品质量的技术手段，步入近代失效分析阶段。20 世纪中叶以来，材料科学的兴起和现代分析技术的突飞猛进使失效分析走上系统、综合、理论化的新阶段，逐步形成了产品失效学。

产品失效学是研究产品丧失规定功能的宏观过程规律、微观机制及其影响因素，预测产品失效性、危险性和预防产品失效对策的一门综合学科。它包括产品功能故障学、产品材料失效学和产品系统失控事故学。在产品研发、设计、制造、维修、使用、服务中将发挥巨大作用。

未经失效分析的一堆产品失效事故残骸，只能作为垃圾处理，而对残骸进行综合失效分析，获得准确结论，则可变废为宝、变为血的教训、社会的宝贵财富。失效分析是人类认识产品世界的一个窗口，失效分析是人类改造产品世界的一把钥匙，失效是可靠之母，事故是安全之母，关键是做好失效分析。

自 1994 年成立中国航空学会失效分析专业分会和召开首届全国航空装备失效分析研讨会以来，每三年一届的全国航空航天装备失效分析会议已逐步办成制度化精品学术会议，成为产品失效学领域的科技工作者获取学术信息的重要途径，也是开展学术争鸣，启发创新思维的重要渠道，在树立良好学风，加强团结，发现和培养人才方面发挥了重要作用，为同行讨论问题，展示各自学术成果，获得同行认可，搭建了广阔的舞台。

全国第五届航空航天装备失效分析会议共征集到 130 多篇论文，经评审录用了 116 篇，希望本论文集的出版对从事航空航天产品失效分析的科技工作者有参考价值，对产品研发、设计、制造、维修、使用、服务部门的工程技术人员和管理人员有借鉴作用，对我国航空航天装备的安全使用和产品质量的提高会产生积极的影响。

最后，对全体论文作者的支持表示衷心的感谢，向为本次会议成功举办和本论文集正式出版作出贡献的所有单位和个人表示衷心的感谢。

张栋

2006年2月13日

目 录

一、综 述

“产品失效学”框架	张 栋 (1)
强化非线性意识、提高复杂性系统的失效分析及应对能力	吕志刚 (15)
断口学科学问题初探	赵子华 钟群鹏 (22)
飞机轮胎事件的调查与失效分析 (综述)	姚红宇 谢明立 (30)
航空发动机叶片失效分析及预防措施研究	陈轶希 沙爱星 毛建波 等 (38)
疲劳损伤定量分析技术研究进展	张卫方 刘新灵 陶春虎 (45)
航空产品的质量与失效	钟培道 张卫方 李莹 (50)
我国大型区管中心空管自动化系统软件的可靠性评估	徐肖豪 王颖利 (55)
塑封元器件失效分析方法及案例分析	李甯然 胡会能 孙静 等 (62)

二、机、箭体系统

故障模式和影响分析在飞机型号研制中的应用	杨勇飞 (69)
某型机方向舵裂纹原因分析及修理方案	万刚 陆存松 张遴吉 (74)
退役飞机结构损伤的分解检查	谭晓明 陈跃良 段成美 (77)
飞机轮胎甩胎故障分析	谢明立 栗牧怀 姚红宇 等 (81)
主起落架摇臂改进及试验研究	王慧梅 张妮娜 (85)
波音 737-300 飞机起落架舱门支架接耳断裂分析	王毅 (90)
起落架轴裂缝原因分析	常青 陈国权 金光慧 (93)
波音 747 飞机右机身起落架倾斜作动筒连接螺栓断裂分析	曹大树 马晓明 (97)
某型飞机主起落架下摇臂套筒断裂失效分析	李文斌 (100)
某型飞机起落架活塞杆磨削裂纹原因分析	曹开磊 曾正宏 陆存松 (105)
直八机主桨叶大梁根部段疲劳试验件接头断裂分析	龙赣 (108)
直升机尾桨传动失效, 导致二等飞行事故	周雄武 (113)
某型 01 架飞机空中停车原因分析	史刚 张运环 (117)
某型直升机飞行事故调查与分析	张运环 史刚 (121)
飞机进气道铆钉断裂分析	陈林 (124)
固体火箭发动机筒体爆破原因分析	徐志刚 张栋 (128)
燃气发生器氧喷嘴断裂导致烧蚀	赵东 马彦东 邹泰斌 (132)
歼×B326 号飞机左发空中停车原因分析	张玉东 (136)

从典型案例看飞机座舱冒烟、起火的电气“火源”

.....	钟栋梁 陈荣 傅国如 (140)
某运输机因机体结构严重腐蚀而报废的原因分析	
.....	陈群志 王逾涯 吴志超 等 (144)
水上飞机的腐蚀失效与腐蚀控制.....	高连云 汪澈 陈景华 (147)

三、发动机系统

航空发动机结构断裂失效分析的基本方法和思路	杨兴宇 耿中行 (152)
某型发动机九级篦齿盘均压孔裂纹及断裂分析	崔福绵 付肃真 (156)
某型发动机涡轮盘榫齿裂纹研究.....	邵超 (161)
发动机涡轮转子叶片失效原因分析.....	曾西军 (165)
GH105 合金涡轮叶片表面完整性研究	陈甲琪 (171)
GH4037 一级涡轮叶片断裂失效分析	赵四辈 (176)
某涡轴发动机动力一级涡轮叶片断裂失效原因分析	
.....	何训 胡祥松 钟宾涛 (182)
某型发动机振动值偏大分析与监控.....	王红宇 祝鹏举 (188)
K417 合金 I 级空心涡轮叶片裂纹故障综合分析报告	
.....	刘庆琰 陈轶希 丁永军 等 (191)
某发动机四级压气机叶片断裂失效分析	柴志刚 沈平 沈英 (198)
压气机叶片断裂分析	田继丰 臧启山 姚戈 等 (202)
压气机一级转子叶片裂纹分析	龚晓宁 孔凡珍 (206)
发动机后中介轴承失效原因分析.....	傅国如 王洪伟 李权 等 (209)
发动机排气门失效原因分析	杨明霞 (214)
离心通风机齿轮轴组件失效分析.....	鲍江波 薄锡金 (218)
航空发动机喷油嘴烧蚀失效分析.....	薄锡金 鲍江波 王国成 (223)
某型飞机发动机自动顺桨故障分析.....	章进 (228)
某发动机加力燃油总管输油圈裂纹失效分析	杨庆富 徐永明 郑伟 等 (233)
发动机用波纹管组件开裂原因分析.....	赵东 卢玉坤 邹泰斌 (237)
航空发动机轴承疲劳失效的监控.....	陈立波 宋兰琪 张占纲 (241)
推力室身部烧穿试片失效分析	韩露 周登陵 (245)
某发动机长试后火焰筒筒体裂纹失效分析	杨为民 郭欣达 (250)
电镀工艺控制不当导致排气门断裂的失效分析	
.....	陈荣 傅国如 王洪伟 等 (254)

四、附件、控制系统与电子元器件

浅谈机电产品的失效分析与预防.....	刘永强 李锋 李鸿鹏 (258)
微动开关概论及失效机理分析	杨颖民 (261)

印制板焊点失效机理分析	王全 胡会能 孙静 等 (266)
齿轮泵主动齿轮轴断裂分析	焦健民 许涛 熊华 (269)
APU 风扇轴断裂失效原因分析	戈阿丽 (273)
液压系统油液污染的危害及控制方法	陆存松 陈聪 (279)
某型飞机氟塑料软管漏油失效分析	王新坤 吴灿伟 陈荣 等 (283)
传动锥齿轮的失效分析	刘金 (287)
襟翼控制系统的故障分析与改进设计	陈伟 (291)
柱塞泵斜盘裂纹原因分析和改进措施	饶励 薛英杰 (295)
某圆柱压缩弹簧裂纹分析	李璠 (301)
液压伺服协调加载系统中电液伺服阀的失效分析	李素强 蔡新锁 (306)
筒形机匣凸耳裂纹分析	刘月辉 杨明霞 (310)
某型机燃油输油管裂纹分析	王红英 夏祥泰 王志宏 等 (315)
电机后端盖失效分析	路兰英 (318)
XX 尾斜轴扭转疲劳断裂失效分析	方建新 (322)
某起动电机保险联轴节断裂断口分析	柴志刚 张栋 欧建平 等 (328)
飞机倒飞油箱重锤摇臂断裂分析	王洪伟 傅国如 (332)
发动机主燃油泵随动活塞皮碗破裂分析	李权 傅国如 许涛 (336)
某型导弹舵机反馈电位器失效分析	王斌 郭海霞 (341)
电爆阀三通固定螺钉断裂失效分析	张栋 李权 柴志刚 (344)
航空断路器某部件中的弹性元件失效原因分析	刘子栋 (351)
两起滑油平衡管失效原因分析	陈荣 张栋 徐志刚 (354)

五、材料及工艺基础研究

装配精度对齿轮传动性能的影响研究	王彦岑 陈礼顺 (358)
航空复合材料结构无损检测技术	蒋荟 杨晓华 (362)
考虑组织劣化影响的耐热钢剩余寿命预测	冯炜 邢丽 赵杰 (368)
氯丁橡胶件贮存期研究	夏洪花 封彤波 杨楠 等 (373)
氢脆静拉伸试棒断裂分析	冯冬云 戈阿丽 (378)
钛合金高密度夹杂物缺陷的性质与预防	蔡建明 马济民 曹春晓 (382)
钛合金疲劳裂纹的萌生与扩展行为研究进展	刘昌奎 张卫方 (387)
线切割加工对 QBe2 板材固溶组织的影响及消除办法	杨维华 平凡 郭海波 (392)
身管内膛镀铬层的抗烧蚀性能研究	张坤 胡莹 陈光南 等 (395)
天然橡胶硫化胶在中性盐雾环境下的老化失效研究	朱立群 黄慧洁 杨飞 等 (400)
有机涂层失效行为研究进展	张蕾 陈群志 王逾涯 (404)
航空有机玻璃失效分析方法	彭春 (408)
继电器触点材料对比分析	李官然 胡会能 孙静 等 (411)

919 合金厚板阳极化处理表面色差缺陷分析温庆红 林林 (413)

六、评估计算与实验室模拟

风险评估技术对我国工业发展的影响孙永庆 钟群鹏 (416)

疲劳断裂失效的拖带几何变形力学描述肖建华 (422)

某振型下圆形裂纹应力强度因子的探讨莫铁根 吴铁鹰 (430)

腐蚀环境下多处损伤疲劳裂纹扩展研究马勇 郁大照 陈跃良 等 (435)

直升机动部件结构的腐蚀疲劳寿命分析方法周凯 金平 柳文林 等 (441)

某水上飞机前梁缘条腐蚀部位腐蚀深度的预测严卫东 (446)

LY12CZ 铝合金初始不连续状态的研究及应用胡家林 陈跃良 郁大照 (451)

疲劳寿命估算的线性累积破坏率准则研究赵海军 金平 柳文林 (456)

用损伤变量 a_1 和 D_1 以及 a_2 和 D_2 描述材料疲劳—损伤—
断裂行为虞岩贵 (462)

航空装备关键部件概率安全性评估方法研究骆红云 张玉波 钟群鹏 (469)

七、其 他

局部过烧螺栓的断裂失效分析庞建召 程恒德 岑举 (474)

非调质钢汽车曲轴的失效分析宣卫芳 罗天元 杨晓然 等 (477)

缸筒固定式油气悬挂连杆断裂机理陈千圣 党玲 张中生 等 (482)

转 K4 转向架弹簧托板开裂研究习年生 丁韦 (487)

翼型伞开伞动载偏大故障分析周民选 (493)

U75V 欠速淬火钢轨电弧焊补失效分析丁韦 宋宏图 姚伟伟 等 (497)

45 钢拉杆断裂失效分析胡晓辉 (501)

柱塞磨削裂纹分析楚书君 (504)

催化车间旋风分离器焊缝开裂原因分析马海涛 赵杰 王来 等 (508)

钛气瓶低压爆破失效分析马芳 郑军 房文彬 (512)

刹车摇臂断裂失效分析姜涛 赵旭 刘高远 等 (516)

下横向限位销座断裂分析孙永玲 (522)

ZEISS 扫描电镜特点及在失效分析中的应用傅国如 张顺勇 (526)

内窥镜在航空发动机维护中的应用左明广 (529)

载人飞船总装内窥镜应用熊涛 乔敏 解承建 (532)

使用全谱元素图像 (Spectral Imaging) 和化合物成分分析软件 (COMPASS)
进行完整的能谱分析王建华 (536)

显微镜——失效分析的主要工具 (539)

“产品失效学” 框架

张栋

北京航空工程技术研究中心, 北京 100076

摘 要 本文首次系统论述产品失效学研究对象、研究方法和技术, 阐明产品失效学的理论组成、主要研究内容, 试图把产品功能故障诊断、产品材料失效分析、产品系统失控事故调查统一在产品失效学框架之内。

关键词 产品 失效学 失效分析 失效预测 失效预防

从人类使用工具开始, 失效就与产品相伴随。失效分析的发展历程, 大体经历了与简单手工生产基础相适应的古代失效分析, 以大机器工业为基础的近代失效分析和以系统理论为指导的现代失效分析三个重要的历史阶段^[1]。

然而失效分析与故障分析、与事故调查分析是什么关系? 失效分析与可靠分析、与安全分析有什么区别? 产品失效分析与产品失效学的理论基础和主要理论组成部分是哪些? 产品失效学作为一门现代新兴的学科分支, 它的研究对象、研究目的, 研究方法和技术、基本组成是什么? 这一系列重大问题有待我们进一步研究。作者首次提出“产品失效学”定义, 并试图构筑“产品失效学”框架, 为“产品失效学”的创立作一分努力。

1 基本概念

(1) 产品——进行生产活动所创造的、符合于原定生产目的和用途的直接生产成果。

(2) 产品失效(故障)——产品丧失规定的功能, 对可修复产品通常也称故障(GB 3187—82)。

(3) 产品失效性:

① 产品(个体)在规定的条件下, 出现失效的持续时间;

② 产品(群体)在规定的条件下和规定的时间内丧失规定功能的程度。当用概率定量描述这种程度时, 称为失效度 $F(t)$ (对可修复产品则用故障率)。

(4) 产品失效分析——产品丧失规定功能而不可修复时, 为判断产品失效模式, 查找失效原因、阐明失效机理称为失效分析(对可修产品一般称故障分析)。

产品出现故障或发生失效时, 有可能引发严重后果, 造成人员的伤亡或物质的损失, 均属于事故。

(5) 产品事故——指产品系统在人们的生产活动中发生的人员伤亡或物质损失的意外事件。

(6) 可靠——产品具备规定的功能, 对可修复产品通常称良好。

(7) 可靠性

——产品(群体)在规定的条件下和规定的时间内完成规定功能的能力。当用概率定量描述这种能力时, 称为可靠度 $R(t)$ 。

——产品(个体)在规定条件下能保持规定功能的持续时间。

(8) 可靠分析——对长寿的可靠产品, 判断产品可靠模式、查找可靠原因、阐明其可靠机理

称为可靠分析。

(9) 安全——人、物、环境构成的系统，在规定或非规定（异常）的条件下，都能保持该系统不发生人员伤亡和物质损失的可控状态（稳定、完整、有序的）。

(10) 安全性

——系统（个体）在规定或非规定（异常）条件下，保持不发生人员伤亡和物质损失的可控状态的持续时间。

——系统（群体）在规定或非规定（异常）条件下，保持不发生人员伤亡和物质损失的可控状态的能力。当用概率定量描述时称为安全度 $S(t)$ 。

(11) 安全分析——对长寿的安全系统，判断产品系统的安全模式、研究安全的原因、阐明其安全的机理，称为安全分析。

失效相对可靠而言，失效性相对可靠性而言，因此：

$$R(t)+F(t)=1$$

事故相对安全而言，事故性（度）相对安全性而言，因此：

$$S(t)+D(t)=1$$

失效（或故障）分析、可靠分析、事故分析、安全分析等都属于事后分析，需要对逐个具体产品进行分析、得出相应模式、原因、机理等明确结论。

对失效性、可靠性、危害性、安全性进行分析时可分为两种对象：

① 如果针对某一具体的产品，则指在规定条件下预测产品保持相应功能状态的持续时间。

② 如果针对产品群体，则指其在规定条件和时间范围内保持或丧失相应功能状态的能力（程度），当定量描述时一般用概率表示。

(12) 安全科学——在规定和非规定或（异常或意外）条件下，研究系统内人、物、环境之间交互作用的过程机制并保持其相地稳定、完整、有序的可控状态的一门学科。安全科学的根本目的是保障人的健康，物的完备和环境的良好。

(13) 产品失效学——研究产品丧失规定功能的宏观外在特征（失效模式和判据）、微观内在过程机制及影响因素，预测产品失效性、危害性以及相应的预防产品失效对策的一门综合学科。根本目的是提高产品质量，避免发生同类失效事件。

① 产品故障学（俗称：故障诊断）是从产品功能学角度，重点研究产品为什么丧失规定功能以及监测排查方法。

② 失效分析是在产品故障学的基础上从材料损伤学角度进一步研究产品丧失规定功能后为何不可修。

③ 产品事故学（事故调查）是从系统控制论角度侧重于研究产品丧失规定功能后为什么会发生人员伤亡和物质损失的意外事件。因此，广义的产品失效学包括产品故障学和产品事故学。

不难理解安全科学研究对象已超出产品的范畴，它泛指人、物、环境组成的大系统，并突出以人为本、首要目标是保障人的健康和效能，因此讲究职业卫生和健康。

2 产品失效学的理论基础

2.1 产品原理及制造学

不同行业有自己各具特色的行业产品，如冶金、化工、煤炭、电力、纺织、建筑、生物、信

息等各行各业的产品，然而机械和电子类产品至今是覆盖各行业应用面最广、数量也最多的主体产品。不同类别的产品功能各不相同，产品设计、制造、维修、使用的原理和制造方法也各不相同。产品原理侧重于产品的功能原理和材料性能，而产品制造学侧重于产品材料的加工、组装、成型、工艺、检验、管理等。冶金产品的理论基础是冶金原理和冶金方法，而机械产品的理论基础是机械原理和机械制造方法。总之，不同类别的产品各有其相应的产品原理及其制造学，它们都是产品失效学的理论基础。

一切违背或偏离产品功能原理及其制造学的产品都有可能导致产品失效。至于是否违背或偏离产品功能原理及其制造学，不同类型的产品都由其相应的技术条件作出明确规定，这就是该产品失效的判据。

2.2 材料科学与工程

材料是人类文明的里程碑，是人类赖以生存和发展的物质基础。人类经历石器时代、青铜器时代、铁器时代、高分子材料时代，如今步入复合材料时代和纳米材料时代，人类已经发现的材料达 800 余万种，具有实际工业价值的也有 8 万种。

材料是一切产品的物质基础，也是一切产品各自功能的物质基础，产品的功能归根到底是由材料的功能提供和保证的。产品失效（不可修复产品）可归结为材料失效，而材料失效的本质可归纳为材料的变质和性能的劣化以及累积损伤超出了产品所规定的范围（即产品失效的判据）。从某种意义上讲，产品失效学本质上是材料失效学，它侧重于材料的环境行为、失效机理和工程应用，它既是材料科学和工程的重要组成部分之一，又是材料科学发展的巨大推动力。

材料性能是材料功能特性和效用的定量度量 and 描述。任何一种材料都有其特征的性能和应用。材料的性质也表示了其对外界环境的整体响应。而材料使用性能则是材料在最终使用状态时的行为（它取决于材料的基本性能），是材料固有性质与产品设计、工况、人类需求相融合的产物。

2.3 思维方法论（思维科学）

作者强调指出：产品失效学的研究对象是人、产品、环境组成的复杂系统中发生的故障、失效和事故等复杂现象。产品失效本质上是材料失效。

就机械产品失效原因而言，有人归纳包括设计不当、材料和冶金缺陷、压力加工缺陷、机械加工缺陷、铸造缺陷、焊接缺陷、热处理不当、再加工缺陷，装配检验中问题、使用和维护不当、环境损伤等 11 个方面，含有可能引起机械失效的 121 个主要因素[2]。分析的复杂性可想而知。

在思维领域，人类的头脑中存在数不清的概念、观点、理论和学说。当我们的头脑（思维主体）只思考一个问题或者一个事物时，也同样面临着数不清的可供思考的对象。脑科学研究表明，人不仅能进行抽象思维，也能进行形象思维；不仅能进行常规思维，而且能进行创新思维。人脑的最大特征就是思维的取向性和思维活动的目的性。思维方法（思路）是从众多的具体问题的思考过程中抽象出来的、又能运用于其他众多具体问题的一般性思路，包括发散性思维、质疑思维、逆向思维、直觉思维、灵感思维、横向思维、纵向思维等多种思路。因此，思维科学是产品失效学的理论基础，是失效分析的灵魂。

任何一个人不管他是否学过逻辑学，是否懂得逻辑，只要他进行思维，就一定要运用概念，作出判断和进行推理。

进行逻辑推理，就是从已有的知识推出未知的知识，也就是从一个或几个已知的判断，推出

另一个新的判断的思维过程，而判断则是断定事物情况的思维形态。只要据以推出新判断的前提是真实的，推理前提和结论之间的关系是符合思维规律要求的，那么，得出的结论或判断一定是真实的（可靠的）。所以，正确运用逻辑推理，是人们获得新知识的一个重要手段，在失效分析中应充分运用。

逻辑推理方法有三类^[3]：一是演绎推理，二是归纳推理，三是类比推理，这是人类几千年逻辑思维的科学总结。在失效分析活动中，推理的客观基础是失效事件事实的内在本性。推理是一种特殊的逻辑思考方式，是分析判断失效事件的逻辑手段，实践告诉我们，排除一百种可能性，不如证实一种必然性。

2.3.1 归纳推理

归纳推理是前提与结论之间有或然性联系的推理。一般说是由个别的事物或现象推出该事物或现象的普遍性规律的推理。即从分析个别事实开始，然后进行综合概括，即从特殊到一般的推理。这里前提是个别性的判断，而结论是普遍性的判断，结论所断定的，超出了前题所断定的范围。

任何失效事件中都存在着特殊和一般的辩证统一关系。失效事件中的每一个证据事实，一定同失效事件的性质相联而存在。而失效事件的性质只能存在于每个证据事实之中。失效分析人员通过对失效事件中每个证据的搜集、比较、分析与综合判断，概括出这个失效事件的一般性结论。归纳推理这一思维过程主要是分析和综合。分析是在思想中把不同对象，对象的个别部分、个别特征、个别属性区分开来，分别加以考察，而综合则是在思想中把失效事件的各个部分和因素结合成为一个整体加以考察。分析与综合是相辅相成的。

归纳法还有经验归纳法（不完全归纳法）、数学归纳法（含统计归纳法）、黑箱法等等。

2.3.2 演绎推理

演绎推理就是前提与结论之间有必然性联系的推理，或者说是前提与结论之间有蕴涵关系的推理。

人们应用（已经由归纳得出）普遍性判断作为前提，从而推出结论，这就是演绎。演绎推理一般说来，是由一般（或普遍）到个别（或特殊）。因此演绎推理的结论所断定的，没有超出前提所断定的范围。从真实的前提出发，利用正确的推理形式，就能够必然地得到真实的结论。这就是演绎推理的根本作用。

演绎推理包括性质判断的推理和关系判断的推理，此外还有复合判断的推理等。

2.3.3 类比推理

我们观察到两个或两类事物在许多属性上都相同，便推出它们在其他属性上也相同。这就是类比法。

在失效分析中，观察到两个失效事件在许多特征上都相同，便推出它们在其他方面也相同。这就是类比推理。当然，通过类比也可以归类，根据失效事件的属性，把它归于某一类失效模式。

类比法的前提和结论，或者都是关于个别事物的判断，或者都是关于一类事物的普遍性判断。因此，它不是一种由个别到普遍的推理，也不是一种由普遍到个别的推理。

类比对象虽有不少相同的特征，但也可能有不同的特征，并可能是不同事件的特定特征，这就决定了类比结论具有或然性。因此类比推理过程中要避免片面性。但应用类比推理，常常可以提出一些有价值的假设，有助于失效分析的深入。我们常说的案例法（判例法）、变更分析法，也

属于类比法范畴。

2.3.4 选择性推理

就形式逻辑学而言，基本的推理法只有上述三类，但在不同学科领域，应用逻辑的基本思维规则，总结出一系列各有特色的推理（分析）方法，在失效分析领域，比较常用的还有选择性推理和假设性推理。

选择性推理是根据失效事件或事件中某一事实的发生存在着两种以上的可能性可供选择。用已知的事实否定其中一部分可能性，从而肯定其他的可能性。这叫做从否定中求肯定。这种推理方法称之为选择性推理。

2.3.5 假设性推理

假设性推理是依据失效事件事实之间的条件联系进行推断的推理方法。特别在证据不足、情况复杂的失效事件分析中，往往要以为数不多的事实和现象为基础，根据已有的知识，提出相应假设（这时要用到归纳或类比推理等），然后进行推理，得出推论（这里又要用到演绎推理）。因为失效事件的事实之间不是彼此孤立的，而是相互联系的（直接的或间接的联系）。某一事实的发生和存在，会伴随另一事实的发生和存在；某一事实的不发生和不存在，也不会引起另一事实的发生和存在。这就叫做失效事件的条件联系。把这些条件联系置于一个假设性判断之中，进行推理，推动失效分析工作不断深化。它在推断失效模式、肯定和否定怀疑失效件、查找失效原因和扩大线索方面起着特殊作用，是失效分析中常用的推理方法之一。

2.4 数理统计和概率论

一般认为产品事故是小概率事件，但故障却时常发生，通常在丧失规定功能的产品中，大部分是可以修复的故障件，只有一小部分是难以修复的失效件，所以失效率远远小于故障率。产品故障可能引起事故，产品失效更可能引起事故，但概率都不大，而两者组合引起事故的概率更小。就典型的航空产品而言，故障率约 10%，失效率约 1%，事故率约 0.1%。因此，故障率 $\gg$ 失效率 $\gg$ 事故率。

在进行产品失效性和产品危害性分析时，不仅要对产品种种失效事件进行统计、分类、作定性分析，并且要在子样数量足够的条件下通过数理统计处理，作定量分析，而统计概率论是必要的理论基础，它也是产品失效预测（评估）的理论基础。

3 产品失效学的理论组成

在产品原理及制造学、材料科学、思维科学和概率论四大理论上，发展出产品失效学的四个学科理论组成。

3.1 产品功能失效学

产品任一功能的丧失都属于故障范畴，均由于违背或偏离产品相应某一功能原理或制造工艺而导致产品功能失效，总结它们之间的因果联系和规律，即形成产品功能失效学（也可称产品故障学），它是产品失效学的理论组成之一。

产品功能失效学的研究重点是：

- （1）产品功能失效的形态学；
- （2）产品功能失效的检测方法和技术；
- （3）产品功能失效的机理；
- （4）产品功能失效的判据。

3.2 产品材料失效学

产品丧失规定功能而不能修复，归根到底是产品材料已经失效，根据材料损伤、物理和化学性能的变化与产品功能失效现象之间的有机联系，总结它们之间的因果规律和过程机理，即形成产品材料失效学，它是产品失效学理论的主要组成部分。

根据材料失效的物理、化学宏观表象特征和微观过程机理不同，可以分成以下几部分：

- (1) 腐蚀失效学；
- (2) 磨损失效学；
- (3) 断裂失效学；
- (4) 变形失效学；
- (5) 垫损伤失效学；
- (6) 电损伤失效学。

3.3 失效分析方法论（思路）^[4]

作者提出：失效分析思路是指在思想中以产品失效的规律（即宏观表象特征和微观过程机理）为理论依据，把通过调查、观察和实验获得的失效信息（失效对象、失效现象、失效环境统称为失效信息）分别加以考察，然后有机结合起来作为一个统一整体进行全过程考察，以获取的客观事实为证据，全面应用逻辑推理等综合分析的方法，来判断失效事件的失效模式，推断失效原因并阐明失效过程机理。因此，失效分析思路在整个失效分析过程中一脉相承、前后呼应，自成思考体系，把失效分析的指导思想、推理方法、程序、步骤、技巧有机地融为一体，从而达到失效分析的根本目的。

在调研和模式诊断阶段，人们通过五官接触大量失效信息，进行形象思维和抽象思维，为进一步的逻辑思维提供重要线索和依据，在失效机理和原因分析阶段，由于因果联系是确定性的关系，所以必须遵循逻辑推理规则，进行逻辑思维，在综合分析和形成结论阶段，是多种思维集成的最重要阶段，不仅需要把形象思维和逻辑思维高度结合，而且需要进行创新思维，因为每次失效都有不同之处，每次分析都应有所创新。

3.4 产品失效概率论

产品失效概率论实际上是概率论在产品失效领域的应用，是对产品（群体）失效性的定量描述，是产品失效预测的理论依据。

4 产品失效分析的主要研究内容

4.1 产品失效（或事故）的模式和判据

1) 可修产品的故障模式（类型）

可修产品基于产品功能故障进行分类，每种产品都有其一系列功能，而产品的种类繁多，所以按产品功能故障分类，数量非常巨大而难以罗列，例如航空产品（飞机）据不完全统计可列出数百种功能故障。

2) 不可修复产品失效模式（类型）

基于产品材料失效的分类。

- (1) 变形
- {

— 弹性

— 塑性

— 粘弹性