“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一元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

需要全本请访问 www.ertongbook.com

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故方法。

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可不可修。

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的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 材料科学和工程

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和描述。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，包括发散忙思维、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。

逻辑推理方法有三大类[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≫失效率≫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基础上，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。

需要全本请访问 www.ertongbook.com

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、物理和化学生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
- （2）断裂
  - 韧性断裂
  - 解理断裂
  - 准解理断裂
  - 疲劳断裂
    - 机械疲劳
      - 应力疲劳
      - 应变疲劳
      - 接触疲劳
    - 腐蚀疲劳
    - 高温疲劳
    - 热疲劳
    - 微动疲劳
  - 沿晶断裂
- （3）磨损
  - 磨粒磨损
  - 粘着磨损
  - 疲劳磨损
  - 腐蚀磨损
  - 微动磨损
  - 变形磨损
- （4）热损伤
  - 熔化
  - 过烧
  - 过热
  - 升华（蒸发）
  - 迁移（漂移、扩散、偏析、偏移）
  - 热冲击
- （5）电损伤
  - 电侵蚀
  - 电腐蚀
  - 电磨蚀
  - 静电放电
  - 雷击
- （6）腐蚀—
  - 化学腐蚀
  - 电化学腐蚀
    - 点蚀
    - 晶间腐蚀（剥蚀）
    - 电偶腐蚀
    - 选择性腐蚀
    - 缝隙腐蚀
    - 气氛腐蚀
    - 生物腐蚀
    - 土壤腐蚀
    - 应力腐蚀
    - 氢脆
    - 腐蚀疲劳
  - 老化（非金属）
  - 变质（油液）

3）产品事故模式（类型）

基于产品所在系统失控事故的分类。

（1）爆炸
- 物理爆炸
- 化学爆炸

（能量的瞬间释放）

（2）起火
- 燃烧起火
  - 固
  - 液
  - 气
- 静电起火
- 雷击起火
- 加热起火
- 摩擦起火
- 电器起火

（3）解体事故

（4）相撞事故
- 车辆相撞
- 飞机相撞
- 船舶相撞
- 其他产品之间的相撞

（5）泄漏
- 气体泄漏
- 核泄漏
- 液体泄漏

（6）毁机事故

上述模式是从外在的宏观整体上认识研究失效过程变化及其后果的特征，每种模式均有其相应的判据。

某一种失效模式的产品失效（如磨损）可以造成产品自身或相关产品多种故障模式（如振动、卡滞、咬死、漏气、渗水、漏油、偏摆、打滑……）；同样，某一种故障模式的产品故障（如振动）也可以引发产品自身或相关产品若干种材料失效模式的失效（如磨损、疲劳、变形、断裂、开胶……）。

1.2 产品失效机理

产品失效机理是从产品功能原理和材料内在微观的物理化学本质揭示失效过程规律及其后果

的必然性。失效模式呈现的宏观特征正是微观过程本质的外在表征，因此不同的失效模式意味着不同的失效过程规律，即不同的失效机理，产品功能失效学和产品材料失效学是产品失效机理的理论依据。

（1）从产品使用功能的角度研究故障机理，主要是用产品功能失效学（即故障学）阐明产品功能失效的原理、原因机制、影响因素及其必然后果。

（2）从产品材料功能的角度研究失效机理，主要是用产品材料失效学（即失效分析学）阐明产品材料失效的形成和发展机理，研究失效的原因、影响因素及其必然后果。

（3）从产品所在系统失控的角度研究事故机理，主要是从产品系统失控学（事故学）阐明事故的形成、发展机理、原因、影响因素及其严重后果。

1.3 产品失效（事故）的致因

任何产品都是根据对产品功能的需求进行开发、研制、设计、制造、维修、使用和服务，对产品规定的功能即是产品质量的核心，又是产品是否失效的判据。

产品失效的原因，就产品而言总体上可以分为三种情况：

1）起因于偏离（或违背）产品功能原理的功能故障。

例如：

（1）缺件（或多件）；

（2）装配不到位；

（3）外来多余物；

（4）产品形状、尺寸、重量、公差、精度等不符合图纸要求。

根据墨菲定律，无论是设计、制造、维修、使用阶段，只要存在差错（失误）可能出现的地方，那么总有一天会发生差错，从而引起故障。

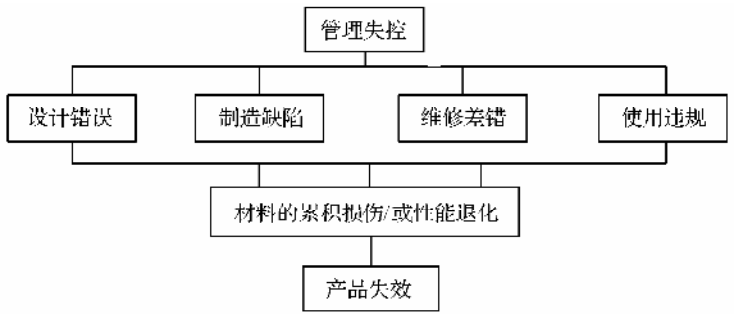
2）起因于材料失效的产品失效

不难理解，由于材料是产品的物质基础，材料功能是产品功能的前提，一旦材料失效，产品功能必然随之丧失。

3）起因于管理失控

管理失控为根本原因的失效致因模型是从产品宏观、总体上阐明致因的理论模型（见图 1），它把产品系统全寿命四个主要阶段的过程分析和材料累积损伤/性能退化的模式与机理分析有机结合在一起，揭示了产品失效的内在规律。

管理失控，是产品失效深层的原因，局部失控引起小范围内的产品失效，全局失控，将造成大面积的产品失效，因此，分析产品失效原因，应当追踪到管理层次。



需要全本请访问 www.ertongbook.com

图 1　管理失控为根本原因的产品失效致因模型

5　失效分析技术

现代材料科学在很大程度上有赖于对材料性能与其成分组织及结构关系的理解，材料的性能包含了材料的物理性能、化学性能和力学性能；材料使用效能与材料固有性能有关，还与设计加工条件和工程环境有关。借助仪器设备进行结构观察和成分表征，还有赖于解释观察结果的分析。历史的经验告诉我们，失效分析技术在不断发展之中，它吸收各门技术之长，取其精华，采用一切可能利用的先进仪器、设备、技术来解决最复杂的产品失效问题。目前在失效分析实践使用频度较高的分析技术有以下几种。

5.1　断口分析技术（断口学）

断口是试样或零件在试验或使用过程中发生断裂（或形成裂纹后打断）所形成的断面。它以形貌特征记录了材料在载荷和环境作用下断裂前的不可逆变形，以及裂纹的萌生和扩展直至断裂的全过程。断口学就是通过定性和定量分析来识别这些特征，并将这些特征与发生损伤乃至最终失效的过程联系起来，找出与失效相关的内在或外在原因的科学技术。

对断口的认识和利用虽可以追溯至远古时代，但断口分析作为一门研究断面的科学则是最近半个世纪的事情。这主要归功于失效分析基础学科的材料科学与力学的迅猛发展，特别是扫描电镜的问世，使断口的微观细节分析成为可能，直接促进了断口学的完善。因此，从 20 世纪 60 年代到 80 年代中期，一系列有关不同材料的断口图谱相继出现。1974 年和 1975 年正式出版的美国金属手册第九卷的《断口金相和断口图谱》、1979 年我国出版发行的《金属断口分析》均是较为系统的断口学专著[5]。虽然断口学已得到很大发展，但仍存在诸多问题，首先是迄今为止的断口分析还基本上是停留在以断口的定性分析为主的阶段。断口学有待发展的另一重要方面是新材料的断口特征以及材料在特殊环境下的断裂行为与其断口特征内在联系的研究。

5.2　痕迹分析技术（痕迹学）[6]

痕迹学应用于失效分析由来已久，但真正成为失效分析学科中的一个学科分支应该说是 20 世纪末的事情，其概念、理论和分析方法在有关文献中有较为详细的介绍。痕迹分析不仅可对事故和失效的发生、发展过程作出判断，并可为分析结论提供可靠的依据。痕迹的广泛含义可定义如下：“环境作用于系统，在系统表面留下的标记称为痕迹。”在产品失效时，定义中的“系统”便是“产品”，而“环境”中的力学、化学、热学、电学等因素“作用”于产品，在产品表面及表面层所留下的损伤性标记，便是痕迹。由于产品表面的不完整性，服役时首先受到环境的破坏作用。因此，产品失效往往从表面层损伤开始，并留下某些特征痕迹。痕迹标记包括表面形貌（花样）、成分（或材料迁移）、颜色、表层组织、性能、残余应力以及表面污染状态等的变化。所谓痕迹分析，即是对上述变化特征进行诊断鉴别，并找出其变化的过程和原因，为事故和产品失效分析提供线索和证据。

根据痕迹形成机理和条件的不同，可以把痕迹分成以下几类[6]：

1）机械接触痕迹

接触部位在机械力作用下所留下的痕迹称为机械接触痕迹（简称机械痕迹），其特点是塑性变形或材料转移、断裂等集中发生于接触部位，并且塑性变形极不均匀。机械痕迹依据接触方式和相对机械运动方式的不同又可分成五种：压入性机械痕迹、撞击性机械痕迹、滑动性机械痕迹、

衮压性机械痕迹和微动性机械痕迹。如果把上述五种痕迹中两种或两种以上痕迹组合，就会产生各种复合机械痕迹。另外，在同一接触表面上也可能出现多次撞击、反复滚压、划伤的情况。

2）腐蚀痕迹

由于化学作用或电化学作用而在接触部位表面留下的反应产物（生成物）和基体材料变质损毛的现象称为腐蚀痕迹。反应产物一般可从以下几方面加以分析鉴别：

（1）形貌的变化，如点蚀坑、麻点、剥蚀、缝隙腐蚀、鼓泡、生物腐蚀等；

（2）表面层化学成分的改变或腐蚀产物成分的变化；

（3）颜色的变化和区别；

（4）物质结构的变化；

（5）导电、传热、表面电阻等表面性能的变化。

3）电侵蚀痕迹

由于电能的作用，在电接触部位或放电部位留下的痕迹。它可分成两类：即由于电接触现象而在电接触部位留下的电侵蚀痕迹和由于静电放电现象而在放电部位留下的电侵蚀痕迹。

4）污染痕迹

各种污染物附着在产品表面而留下的污染痕迹，即污染物的自我像。鉴别污染痕迹除了各种理化检验方法之外，还可利用气味鉴别，如烟味、油味、火药味、油漆味、酸味等。

5）分离物痕迹

分离物主要是指接触面在物理、化学作用下从接触面上脱落下来的颗粒，它既可以是产品表面的分离物，也可以是反应产物的脱落物。这些分离物是某一痕迹产生过程的终了产物。目前颗粒鉴定已发展为一项专门技术，其中铁谱分析及其应用已相当成熟。

6）热损伤痕迹

由于接触部位在热能的作用下发生局部不均匀的温度变化而在接触部位表层留下的痕迹。金属表面层局部过热、过烧、熔化，直至烧穿，漆层及非金属表面的烧焦都会留下热损伤痕迹。

5.3 工况和环境分析技术

产品失效大多是在使用过程中发生的，使用中的工况变化是频繁而复杂的，而使用环境也变化多端，其中主要的表征参量有以下几类：

（1）力学参量（如应力的大小、方向、分布、载荷谱、残余应力等）；

（2）温度参量（温度高低、温度场、温度梯度、温度谱等）；

（3）湿度参量（相对湿度大小、变化范围、湿度谱等）；

（4）介质参量（介质种类、浓度、比例等）；

（5）辐照参量。

此外有速度参量、振动参量、重量、电流大小、磁场强度等。

在多因素、复杂环境下的材料行为和失效机理始终是产品材料失效学研究的重点，因此，使用过程中工况参量的变化和环境条件的改变，通过各种相应的检测手段记录在案，这是重要的失效分析信息。

实践表明，在失效分析中常用的理化测试技术还有：成分分析技术；金相检验技术；结构分析技术；性能测方技术；无损检测技术；故障监控和事故预警技术等等。

6　产品失效（或事故）预测

产品失效预测实际上是预测产品的失效性（定性分析）和失效概率（定量分析）。根据产品所处阶段不同，产品失效预测可以分成几类：

（1）使用中的产品已发生失效事件后对同类产品继续使用时，可能发生同类失效事件的预测。

（2）使用中的产品已发生产品事故后，对同类产品继续使用时可能发生同类或不同类事故的预测。

（3）对未经使用考验过的新型产品，预测其在使用中失效的可能性。

（4）对产品总量极少而特别重要或昂贵的特殊产品，进行单个产品使用寿命预测和危害性评估（风险评估）。

产品失效预测就是由产品过去和现在去推测未来，由已知去推测未知。推测的依据是产品过去的历史资料、在线的运行数据、失效事件的后果及其影响，失效分析的结论以及将来工况和环境可能发生的变化等等，即一切尽可能详尽的与产品使用相关的信息。预测就是通过上述产品过去和现在的状态去推测产品将来的失效可能性和失效状态。

预测分析包括：定性分析、定量分析、定时分析、定比分析以及对预测结果的评价等。预测方法很多，据统计至今已有 150 种以上，常用的也有二三十种，主要预测方法有：

（1）经验推断预测法（头脑风暴法、特尔菲法、主观概率法、实验预测法、相关树法、形态分析法、未来脚本法）。

（2）时间序列预测法（滑动平均法、指数滑动平均法、周期变动分析法、线性趋势分析法、非线性趋势分析法等）。

（3）计量模型预测法（回归分析法、投入产出分析法、宏观经济模型）。

（4）因果分析法（函数关系法、相关关系法、因子推演法）。

7　产品失效预防

产品失效预防建立在产品失效分析和产品失效预测的基础上，这里往往涉及产品失效预防的具体技术措施，从原则上讲，采用新材料，新工艺、新技术有利于预防产品失效，而新材料、新工艺、新技术的发展很快，门类很多，失效学研究的重点在于：在应用“三新”时可能出现的新的失效模式、机理和原因，研究新的预防失效的对策。

在阐明产品失效致因论和长期实践的基础上，作者总结提出以下预防失效产品失效的系列对策[1]。

1）降寿避免失效

一旦出现产品失效，普查又发现故障比例相当高，尤其当故障率与使用寿命相关时，这时对司类服役产品可采取以下对策。

（1）在来不及采取其他有效措施时，一般先暂停使用，尤其当产品失效可能危及安全时，不得不采取这个下策。

（2）根据失效性公式，失效率 $F(t)$是时间的函数，它与可靠度 $R(t)$关系如下：

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

在全寿命期内，设计时已有期望的可靠度，或者说已有允许的失效率（概率）。如果一时难以采取有效的修理措施，则可临时采用降寿措施。

（3）类似的对策是缩短故检周期或翻修间隔，都是根据失效概率与使用时间的相关性，避免同类失效的再次发生。

2）切断失效起因链

每一失效事件，经过客观公正认真的失效分析，找到了所有独立的起因（一般为多个起因），组成一条失效起因链。从理论上讲，只要消除多个起因中的某一个起因，就可以切断失效起因链，从而避免同类失效的再次发生。据此，提出具体对策：

（1）故检抽查——抽查同类零部件是否存在同类故障。

（2）普查——一般先查长寿命段、后查较短寿命段的产品，并对故障率和使用寿命作统计分析。

抽查不一定要等到找出所有起因，根据多因串联式失效起因链找到一个独立起因，就可设法消除这个起因而切断链，以避免同类失效。

3）维修逐个消除起因

普查只是发现故障，暴露失效隐患，为了避免同类失效，则必须消除一切隐患：具体措施有：

（1）报废：

（2）原位修理；

（3）局部强化；

（4）消除其他起因。

这些对策，看起来似乎头痛治头、脚痛医脚，但却是工程上最简便实用的办法。

4）增强材料抗累积损伤能力，提高材料抗退化性能

（1）局部强化：对已服役的装备，在普查时没有发现故障，可以留待翻修时采取强化措施；

（2）对于在制产品，一般应研究更完善的强化措施，可供选择的方法也更多；

（3）提高材料抗退化性能。

5）改善使用环境，避免产品失效

对已服役产品，改善使用环境，实际上是降低功能指标，有点委曲求全。例如降低工作压力、降低工作温度、降低介质浓度等等。

6）增加监控项目

在差错和后果之间，还可设置一道防线——检查，这已成为一道必不可少的工序，常常起到预防失效的关键作用。这种对策，实际上是在失效起因链上增加了一个人为可控的独立起因。

7）失效树分析对策

缺陷树、故障树、失效树、事故树分析方法的实质，都是针对系统和同类产品群体进行因果逻辑推理分析，定性可以找出系统（或产品）的薄弱环节，确定失效原因各种可能的组合方式，因此，它是从全局上预防失效的好方法。

我们所说独立起因，就相当于失效树中的基本事件，一个最小割集表示一种可能失效，为了降低失效率，可以采用增加基本事件的方法，例如我们在上述对策中采取的不少措施，实际上就是增加基本事件，即设置更多的独立起因，使失效发生概率迅速下降。从另一角度讲，一般消除最小路集中的某一个基本事件，即可避免同类失效，这时选择最省工、最经济、最有效的消除某一独立起因的措施，才是英明决策。

8）完善管理，从根本上杜绝同类产品失效

（1）传统的做法是吸取教训举一反三，组织自查和管理层查，并力争做到警钟长鸣，加大宣传力度，评比、岗位练兵，使质量第一预防为主的观念深入人心；对引起严重后果的失效事件，

有时还要追究直接责任人和有关人员及领导人的责任，但是对人的处理不是最终目的，关键是防范措施要落到实处。

（2）对起因追根求源，失效起因链中列上的若干独立起因，是追根求源的依据，人们常讲的一查到底，一方面要求不漏掉任何一个独立的起因，另一方面要求对独立起因作出详尽的因果联系分析，根据管理失控的失效致因论，这是根本原因，只有找到管理上的漏洞，才好采取根本措施。

（3）管理失效树分析。管理是社会系统中联系各级层次子系统的纽带，是社会的生命力所在，社会系统中的一切功能都赖以展开，管理是通过信息促使能量和物质进行合理流通。管理是科学，也是生产力。从管理学角度来讲，管理系统之间的界面往往容易失控。因此不妨把失效树分析方法引+入复杂管理系统，进行深入的管理失效树分析。最后需要指出，失效分析需要成本，而预防失效可能成本更高，采取不同的预防失效对策，预示着不同的成本支出，在不同具体条件下，优选和组合上述对策，将使你的产品更具有竞争力，市场会给你更丰厚的回报。

参 考 文 献

1. 张栋，钟培道，陶春虎，等. 失效分析. 北京：国防工业出版社，2004
2. 刘民治，钟明勋. 失效分析的思路与诊断. 北京：机械工业出版社，1993
3. 金岳霖. 形式逻辑. 北京：人民出版社，1979
4. 张栋，等. 机械失效的实用分析. 北京：国防工业出版社，1997
5. 金属断口分析编写组. 金属断口分析. 北京：国防工业出版社，1979
6. 张栋. 机械失效的痕迹分析. 北京：国防工业出版社，1996

作者简介：

张栋　男，1941 年出生，中国航空学会失效分析专业分会副主任，中国机械工程学会理事，国家安全生产专家组专家，全国有突出贡献的失效分析专家，享受国务院特殊津贴专家。

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
空军装备部科订部，北京 100843

摘　要　本文对非线性及非线性系统、非线性思维等基本概念、发展历程等进行了综合性的介绍，结合几起重大故障的失效分析，提出要运用非线性科学理论和非线性思维方法，寻求复杂性系统失效分析工程的管理与应对能力的突破。

关键词　非线性思维　基本概念　特征　应用

当前，我军装备失效分析与预防工作面临着“复杂性”的严峻挑战。提高复杂性系统的失效分析及其应对能力是装备失效分析与预防工作领域所面临的最大量、最普遍的问题。

“非线性”是“复杂系统”的基本属性。提高复杂性系统的失效分析及其应对能力就必须进行“非线性”知识和“非线性思维”方式的必要补充。本文旨在从“非线性思维”这一基本点出发，引发人们对如何提高复杂性系统的失效分析和应对能力进行思考。

1　“非线性”及非线性系统的基本概念

所谓“非线性”是针对“线性”而言的一个概念。“线性”概念是指：量与量之间按比例、成直线或光滑过渡关系，在空间和时间上代表规则的连续运动方式。“非线性”概念则指：量与量之间不按比例、不成直线或非光滑过渡的关系，代表不规则运动和突变运动方式。

《大英百科全书》对“线性”和“非线性”是按照系统来定义的，认为：“线性系统是指系统对于某种力的响应是严格成比例的，不会出现浑沌行为那样力的巨大放大。非线性系统潜在着浑沌，其行为模式变化多端，不可能用精确的数学分析进行描述，直到巨型计算机问世，人们对非线性系统的本性才有了一些探索性认识，对司空见惯的浑沌现象开始有所了解。”因此也可认为，系统响应成比例的是线性系统，不成比例则是非线性系统。

自然界和人类社会存在着大量的非线性现象，令人眼花缭乱。如：激光的生成就是非线性的，天体运动的混沌行为是非线性的，材料纳米技术问世后，材料的性质是非线性的。

正如美国麻省理工大学气象学专家罗仑兹教授所发现的：复杂的非线性系统对初始值（温度、气压、风向等参数）具有极端的不稳定性，它潜在着生成浑沌的可能。初始条件的微小变化，可以引发非线性系统的巨大突变，真可谓是亚洲的几只蝴蝶扇扇翅膀，几个月后的美洲某地就会刮起龙卷风！这就是著名的非线性系统的“蝴蝶效应”。

本文仅对诸多领域非线性科学研究成果，从总体上进行粗略的归纳和综合，理清非线性系统的基本特征与特性以及非线性思维的基本观点，并用非线性思维方式提高复杂系统失效分析的应对能力。

2　非线性科学

2.1　非线性科学的时代性

非线性科学是研究各领域复杂性现象、复杂性系统的一门新科学，它是伴随着各领域对非线性现象研究的不断深入、不断发展而形成的。人类对非线性现象、非线性系统的科学认识就是非线性科学。非线性科学是 20 世纪中叶至今，人类自然科学进步和发展的重要标志，是继相对论和量子论之后的又一次“革命”，它给人类科学技术以巨大的推动，同时也深刻地影响着社会科学的发展，许多领域长期存在难以认识的复杂性问题，都用非线性理论做了新的科学解释。

捕捉非线性现象，建立非线性系统的动力学方程，描述其结构状态及其演化方向，进行深刻的物理意义、科学意义及社会意义的分析，成为非线性科学研究的一个时代特点。

2.2　非线性系统的基本特征与特性

2.2.1　非线性系统的“复杂性”特征

非线性系统是由多要素构成的复杂系统。“复杂性”是非线性系统的基本特征。这种“复杂性”主要体现在：系统具有多个要素相互作用和彼此依存的“长程”关联性，系统具有“牵一发而动全身”的动力学性质；系统具有若干参量的输入、输出和信息在系统中自由流动，并受周边环境影响的开放性；系统具有复杂的内部结构及结构的自组织功能、结构状态演化方向的多重选择和选择的偶然性特性。

2.2.2　非线性系统的整体协同特征

整体协同是非线性系统的另一个主要特征。非线性系统的整体协同不等同于传统意义的整体性，具有特别的内涵。传统意义的整体性主要体现在作为万物始基“一”的整体存在与多样性的统一。而非线性系统的整体协同是指系统各要素的动态相互作用及系统整体所具有的自组织功能。

2.2.3　非线性系统的对称破缺特征

对称破缺（Symmetry Breaking）作为非线性系统的又一个重要特征，则在于引导人们正确地找到推进系统进化的根源。对称破缺是指非线性系统在自组织的过程中所产生的相变。相变的产生意味着系统现时的存在状态与原本的存在状态发生了原则性改变，原本的结构与现时的结构出现了不对称。在不对称的后面存在着引发对称破缺的根源。对称破缺主要表现为事物在空间构型上的根本改变。对称破缺反映了非线性系统从稳定结构到非稳定结构的生成过程。

2.2.4　非线性系统状态演化的多重选择与选择偶然性特征

多重选择是非线性系统的基本特征，其本质表现是选择进化。当非线性系统发生对称破缺，从稳定结构向非稳定结构发展进而向新结构状态演化时将出现分叉现象。在分叉点上，系统究竟会出现什么样的结构模式，以及状态变化的选择方向，具有极大的偶然性。

2.2.5　非线性系统的结构自组织和系统“突变”响应特性

非线性系统不仅有自身特定的结构，而且存在于特定的外部环境中。非线性系统的某一局部或在某一阶段，有可能是稳定结构，具有线性特征，这时系统的响应可能是几个要素单独作用的

线性叠加、成比例的变化，只存在系统各方向的扩展或缩小，没有结构的再构建问题。随着条件的改变和特殊过程的实现，系统会发生“突变”，从结构稳态跳跃到结构不稳定状态。非线性因子在系统重构过程中，起了极其关键的作用。非线性系统发生突变时只能是一个要么死亡、要么再生的系统，其现实结构的维持，是以物质、能量和信息的连续不断的输出和输入为条件的。在临界点上，微小的非线性变化，也会引发结构产生巨大改变的系统整体响应。

2.2.6 非线性系统的长程关联特性——“涨落”放大机制

“涨落”是指由某些成为非线性因子的参量和要素发生变化时所引起的系统局部或整体的状态变化量，它是描述非线性系统状态的一个重要概念。非线性理论认为，系统中存在的涨落类型影响着将遵循的分支选择。系统中某种不稳定结构的存在，正是某个涨落的结果。非线性系统的长程关联（Long-distance connection）特性是指，某个非线性因子所产生的某个微小涨落，初期被局限在系统的一个很小的局部，后来发生随机扩展，经过系统内在的放大作用，在较远的时间和空间范围内，最终能成为决定系统命运的基本力量，并引发出系统新的宏观状态。

3 非线性思维

3.1 非线性思维的基本概念

根据不同的表述需要，人的思维方式、方法有着多种分类形式。但从总体性出发可高度概括为两类即：线性思维和非线性思维（the non-linear thought）。

“线性思维”是经验思维、惯常思维、稳态思维、封闭思维、决定论思维和程序化、规范化思维方式的统称。

“非线性思维”是以广义相对论、量子力学为核心的现代科学和当代非线性科学为基础的“后现代”科学思维方法，在思维理念上崇尚系统要素的整体协同作用，要求在思维中建立科学的时间和空间坐标体系，提高在动态中处理信息和应对“复杂性”的能力。非线性思维使人的思维更敏锐、更灵活、更科学，它是一切创新活动和应对“复杂性”的思维动力源泉。

我们主张非线性思维并非认为线性思维“一无是处”，线性思维要求人们思维的规范化、程序化，在现实生活中仍然发挥着积极的作用。提倡非线性思维的目的是为了理性地扬弃线性思维中的模式化思维定势，突破“思维惯性”和因循守旧，为创新和应对“复杂性”开辟思维的绿色通道。

3.2 非线性思维的基本观点

3.2.1 客观认识“世界”（主观、客观）的非线性本质

20 世纪上半叶直至当今时代，人类大量的自然、社会科学特别是非线性科学的研究表明，我们所面对的“世界”在本性上是一个非线性的世界。非线性思维从总体上认为：“世界”（主、客观世界）是非线性的。非线性与线性并存，从本质上说仍然是非线性，线性只是非线性忽略了某些限制的特殊表现形式。

3.2.2 由封闭被动型走向开放能动型，由局部狭义型走向全局战略型，由决定性走向或然性的思维非线性特征

非线性思维以现实存在的“复杂性”为出发点，追求事物存在的非线性客观自然性，并漠视

需要全本请访问 www.ertongbook.com