



国防特色教材·动力机械及工程热物理

内燃机失效分析与评估

NEIRANJI SHIXIAO FENXI YU PINGGU

张卫正 刘金祥 编著
原彦鹏 魏春源

北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社 哈尔滨工业大学出版社
哈尔滨工程大学出版社 西北工业大学出版社



国防特色教材·动力机械及工程热物理

内燃机失效分析与评估

北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社 哈尔滨工业大学出版社
哈尔滨工程大学出版社 西北工业大学出版社

内 容 简 介

以宏观判断与分析为主要出发点,进行机理研究,从机理引出措施,探讨主要影响因素及影响规律,从而建立模型、预测寿命。本书介绍以内燃机为主的各类典型故障的机理、故障的模式以及失效的痕迹特征;根据故障的痕迹特征,判别故障的原因,提出解决或缓解故障的措施,并进行故障(寿命)评估;介绍失效分析与评估的方法和途径。

本书主要作为动力机械及工程学科、从事内燃机可靠性方向研究的硕士生和博士生的教材,并适用于相关技术人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

内燃机失效分析与评估/张卫正等编著. —北京:
北京航空航天大学出版社, 2011. 3

ISBN 978-7-5124-0348-2

I. ①内… II. ①张… III. ①内燃机—失效分析
IV. ①TK407

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 025113 号

版权所有,侵权必究。

内燃机失效分析与评估

张卫正 刘金祥 编著
原彦鹏 魏春源
责任编辑 王 实

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱: bhpress@263.net 邮购电话:(010)82316936

涿州市新华印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×960 1/16 印张:15.25 字数:342 千字

2011 年 3 月第 1 版 2011 年 3 月第 1 次印刷 印数:2 500 册

ISBN 978-7-5124-0348-2 定价:32.00 元

前 言

现代内燃机已经发展了 100 多年,它不仅引发了第二次工业革命,而且支撑着各个经济大国的支柱产业——汽车工业。能源、动力、汽车已经成为现代社会不可或缺的重要组成部分。现代内燃机的发展史是一部研究者不断追求提高经济性、提高可靠性、降低排放的历史。然而,近 10 年来人们更加关注降低排放和提高经济性的研究,对提高可靠性的研究有所忽视。殊不知,可靠性是一切新技术应用的基础。从全寿命概念上讲,提高可靠性就是提高全寿命周期的经济性,同时也有利于降低内燃机使用过程中的排放。可靠性研究的薄弱是我国众多新技术无法实用的根本原因,也是造成我国所研制的内燃机和汽车技术落后的关键问题之一。

本书作为内燃机方向的硕士生和博士生的教材,作者希望通过该课程的学习,使学生掌握内燃机各类典型故障的模式、故障的机理以及失效的痕迹特征,根据这些故障的痕迹特征,判别故障的原因,提出解决或缓解故障的措施;同时,学习和掌握失效分析与寿命评估的方法与途径,并具备进行故障(寿命)评估的能力。

本书注重将实际故障的图片、故障机理分析与寿命评估理论相结合;在侧重寿命评估方法介绍的同时,尽量包含内燃机各关键零件寿命评估的实例;在重点介绍寿命评估理论的同时,也适当介绍了数值计算评估与实验评估的方法。在对失效问题的研究过程中,以失效现象宏观判断与分析为出发点,进行机理研究,从机理引出措施,并进一步探讨主要影响因素及影响规律,从而建立模型,进行寿命预测。

本书针对性强,既可以作为硕士生和博士生的教材,也适用于相关技术人员学习参考。

由于内燃机的失效模式很多,因此本书侧重介绍理论性较强的机械负荷、热负荷以及摩擦磨损的失效分析与寿命评估的内容。在机械负荷失效分析中,重点介绍低循环疲劳等本科教学中很少涉及的内容。

目前,涉及失效模式分析特别是机械失效分析的书很多。但是内燃机作为热

机,热负荷失效是一个很重要的问题,其各种主要失效往往都直接或间接受到热负荷的影响。因此,本书用三分之一以上的篇幅重点介绍热负荷失效,以区别于相关失效模式分析的其他著作。另外,作为硕士生和博士生的教材,书中以较大的篇幅介绍了各种寿命预测的理论和方法;工程技术人员在参阅本书时,可以根据使用情况做出合理选择。

作者在撰写本书过程中,参阅了大量已经发表图片和寿命预测实例。有一些资料的来源可能在参考文献中未能全部标注清楚,在这里一并向进行内燃机及相关领域可靠性研究的同仁们表示感谢。同时,在撰写本书时发现,当前进行内燃机各类失效寿命预测研究的文献非常少。因此,在这里提议各位同仁更加重视该学科的研究,也希望有更多的硕士生、博士生毕业后能加入到该学科的深入研究中。

感谢博士生向长虎、刘晓、赵维茂、刘畅和曹元福以及硕士生王月、章磊在资料收集整理、翻译等方面给予的协助;感谢陆际清教授、左正兴教授对本书所进行的评审和修改。最后,对出版者、所有与发行本书有关的评阅人等,对他们的关心和合作表示谢意。对本书有任何批评和建议,希望不吝赐教,以便改进我们的教学和学术研究,必要时及时修改我们的教材。

作 者
2010 年 1 月

目 录

第 1 章 失效分析的概念与常规方法	1
1.1 失效分析与评估的概念	2
1.1.1 失效分析与评估的定义及研究目的	2
1.1.2 失效分析与评估的基本问题	4
1.1.3 失效(故障)模式与分类	6
1.2 内燃机失效分析的常规思路	7
1.2.1 常用的几种失效分析思路	7
1.2.2 失效分析的程序和步骤	10
1.3 失效分析中的几种系统工程方法	12
1.3.1 失效模式及后果分析法(FMEA)	12
1.3.2 故障树分析法(FTA)	17
1.3.3 模糊数学分析法	24
第 2 章 内燃机异常工作状况与失效	32
2.1 内燃机频繁冷启动与失效	32
2.2 长期低速、怠速工作与失效	34
2.3 汽油机燃烧异常与失效	35
2.3.1 汽油机爆燃	35
2.3.2 表面点火	39
2.4 柴油机燃烧粗暴与失效	41
2.5 柴油机异常喷射与失效	42
2.5.1 二次喷射	42
2.5.2 后喷滴油	45
2.6 内燃机改进过程中的失效问题	46
第 3 章 内燃机机械失效模式与诊断预防技术	48
3.1 内燃机机械失效模式	48
3.1.1 内燃机机械失效定义	48

3.1.2	内燃机机械失效的主要模式	48
3.2	裂纹源位置的判别技术	52
3.3	常见机械失效的宏观断口特征	57
3.3.1	拉伸过载断裂特征	57
3.3.2	扭转过载断裂特征	62
3.3.3	弯曲过载断裂特征	63
3.3.4	疲劳过载断裂特征	63
3.4	内燃机机械失效的特殊预防技术	67
3.4.1	应力放大与应力流设计	67
3.4.2	接触表面失效的变形协调设计	70
3.4.3	抗断裂设计技术	73
第4章	内燃机机械失效寿命评估理论与方法	75
4.1	结构的应力与应变	75
4.1.1	应力张量	75
4.1.2	应变张量	79
4.1.3	偏应力张量和偏应变张量	80
4.2	静载荷下常用的强度理论	81
4.2.1	简单应力状态下的强度理论	81
4.2.2	复杂应力状态下的强度理论	83
4.3	交变载荷下的强度理论	94
4.3.1	交变载荷与疲劳失效	94
4.3.2	高循环疲劳失效机理与安全判据	96
4.3.3	低循环疲劳失效机理与安全判据	102
4.4	断裂力学安全判据	116
第5章	内燃机热负荷失效模式与诊断预防技术	120
5.1	内燃机热负荷失效模式	120
5.2	内燃机主要零部件热负荷失效现象及原因	127
5.3	内燃机热负荷失效特殊预防技术	130
第6章	内燃机热负荷失效寿命评估理论与方法	135
6.1	高温蠕变理论与失效准则	135
6.2	高温低循环疲劳特征与寿命评估	146

6.3	热疲劳特征与寿命评估	150
6.4	内燃机热疲劳寿命评估应用	155
第7章	内燃机受热件热疲劳寿命的实验评估	163
7.1	热疲劳模拟实验研究方法	163
7.2	热疲劳实验的加热特性	167
7.3	热疲劳寿命实验评估	170
第8章	内燃机摩擦磨损失效模式与诊断分析	181
8.1	摩擦的基本概念及影响因素	181
8.1.1	基本概念	181
8.1.2	库仑摩擦定律	182
8.1.3	影响摩擦的因素	183
8.1.4	活塞与活塞环的摩擦	184
8.1.5	轴承与轴瓦的摩擦	188
8.2	内燃机的磨损失效模式及影响原因	188
8.3	内燃机主要零部件的磨损与诊断分析	192
8.3.1	轴承磨损失效分析	192
8.3.2	活塞、活塞环和气缸的磨损	200
8.3.3	凸轮和挺柱的磨损	211
第9章	内燃机磨损失效评估理论与方法	213
9.1	赫兹接触理论	213
9.2	固体磨损计算	217
9.3	磨损寿命预测计算方法	222
9.4	内燃机磨损失效评估实例	227
参考文献		232

第 1 章 失效分析的概念与常规方法

内燃机发明至今已经有 100 多年的历史了。如果说内燃机的发明是由追求高效率的动力机械这一社会需求推动的结果,那么内燃机从真正实用到普及,便要归功于人们在提高可靠性方面所做的大量工作。从内燃机发展史来看,人们在内燃机可靠性上所做的工作远远多于为提高性能而进行的研究。以至于当前很多人认为,对内燃机来说无论从材料、工艺、设计,甚至使用维护都已经很成熟了。

然而,由于内燃机是一个独立的动力系统,功能异常复杂,很难进行优化设计,因此早期的设计往往比较保守。随着内燃机强化程度的提高,以及移动式车辆对内燃机单位体积功率、单位质量功率指标要求的不断提高,挖掘材料、工艺、设计等的潜能,将其尽可能用到极致,是当前内燃机可靠性研究的重点之一。

尽管当前内燃机研究的重点是降低排放和提高经济性,但是改善排放和经济性所采用的措施,绝大多数会降低内燃机的可靠性。例如,部分低排放柴油机的爆发压力已经突破 20 MPa,并常采用收口式燃烧室,加强缸内涡流,减少活塞环的润滑油供应等措施,但这些措施都对提高可靠性不利。因此,当前研究内燃机可靠性的另一个重点是为降低排放和提高经济性提供保证。目前,国内对此研究还不够,许多技术措施难以实用。

100 多年来,内燃机是在不断克服新挑战、解决新问题的过程中发展的。例如,当活塞处于上止点附近时,活塞环与缸套间处于接近干摩擦的混合润滑状态,高温环境、冷却不良,以及大量摩擦热使该处很容易出现熔着磨损;高强化柴油机铝合金活塞的使用温度已经达到 350℃,其强度只有常温下的 20% 左右,等等。同时,内燃机复杂的使用状况使其很难维持在正常的工作状态,内燃机的失效往往是由整机或系统的异常工作引起的,即所谓“因异常,而失效”。内燃机的异常工作状况包括:频繁冷启动,长时间低怠速工作,汽油机出现爆燃、激爆,柴油机供油出现二次喷射等。这也是本书将从内燃机的异常工作状况的角度展开失效分析的原因。

内燃机可靠性研究的一个有效途径是从实际的失效问题出发进行研究。这样,不仅可以使研究者易于找到内燃机的薄弱环节和重点;同时,失效问题还给研究者提供了大量信息和很多值得研究的学科难点。这种研究方法有的放矢,实用性强。

与其他失效分析的著作相比,本书具有以下特点:

- ① 以内燃机零件的各种失效为对象进行研究,针对性强。
- ② 重点从内燃机应用与工作原理角度进行失效分析。因此,详细阅读本书需要有内燃机构造、原理和设计方面的知识。
- ③ 从内燃机的实际失效分析入手,最终的目标是寿命的预测评估。
- ④ 以研究为主,内容涵盖机理分析、计算研究、预测模型、概率分析和试验研究等。

⑤ 侧重于热负荷失效与寿命评估研究。内燃机作为热机,有别于普通机械失效的是热负荷失效,而且所占的比例很高,所涉及的零件包括:活塞、缸盖、缸套、排气门和涡轮等在高温下工作的受热件。

⑥ 简单的概念和通用知识不作展开解释。对通用知识也只作简单介绍,详细内容可参阅其他论著。同时,教师或学生可以结合自己的专业背景去理解或找到对照实例。

1.1 失效分析与评估的概念

1.1.1 失效分析与评估的定义及研究目的

1. 失效的定义

零部件丧失其规定功能的现象,称为失效。对可修复零部件的失效通常也称故障。故障额外强调了对丧失功能的可修复性。失效与故障的概念有一定的区别,但在工程上“失效”与“故障”常可混用,在本书中不加以特别区分。

失效根据其严重程度可分成以下三种情况:

① 完全不能工作。如曲轴断裂、气门弹簧断裂。

② 虽然还能运行,但已经部分失去原有的功能。如活塞环磨损严重,造成密封性能变差,功率下降过大。

③ 虽然能运行,并能发挥原有的功能,但因受伤而不能安全可靠地工作。例如,缸盖鼻梁区出现严重但并未穿透的裂纹。

内燃机零部件的失效有两大类。其中:一类是电子管理系统零件的失效,这类失效的机理较为简单,诊断自成体系;另一类是内燃机金属零部件及机构的失效。后者为本书的主要研究内容,在今后的论述中不再特别强调。

2. 失效分析

失效分析是指失效事件发生后,分析引起产品失效的原因,并提出对策,以防止其再发生的技术活动和管理活动。其中的核心内容是失效原因的分析,而最终的目的是要防止或减少失效的再发生。

3. 失效评估

失效评估包括两个方面:失效的严重性评估和可靠性寿命预测。

失效的严重性评估与失效内燃机的型号、使用该内燃机的机械、周边状况等具体问题密切相关,技术性、政策性很强,但涉及的理论相对不多。因此,本书所述的失效评估主要指可靠性寿命预测,它包括根据失效事件的统计分析进行寿命预测,或根据零部件的工作状况进行设计

寿命预测,或根据已经出现的轻微失效进行余寿命预测。显然,可靠性寿命预测不再将失效看成一个只有失效与不失效的二值变量,而是损伤连续演变的连续变量,而且它贯穿于从设计、制造、维护到使用的各个阶段。

不同阶段寿命预测的分析方法和目的有所不同:

① 在设计阶段,常基于计算,采用全寿命预测方法或局部应力应变法和损伤容限法(基于检测及计算断裂力学方法),寿命评估的主要目的是校核设计的合理性。

② 在使用阶段,常基于测试,采用损伤容限法,主要目的是确定余寿命。

③ 在维修阶段,常采用统计分析的方法,主要目的是寻找失效的统计特点与主导因素。

当然,最终目的都是为找出薄弱环节,提出改进措施,指导设计、改进、使用和维护,提高寿命服务。

4. 失效分析的重要性

① 可总结经验教训,为产品设计和制造工艺的改进及其合理使用提供科学依据,避免同类事故再次发生。

② 能促进引进技术的消化,对进口设备的失效分析,可提供与外商索赔谈判需要的技术依据。

③ 失效分析的结果是修订或制定各相应规范、标准或法规的主要依据。

④ 使维护和修理工作事半功倍。

⑤ 失效分析的统计资料是制订科技开发规划和经济发展规划的重要依据之一。

⑥ 为正确处理现场技术问题提供必要的科学依据。

⑦ 可为公安部门侦破案情提供关键性证据,等等。

5. 内燃机失效分析的难度

① 内燃机应用于各种各样的场合,工作条件复杂多变,使用环境资料的收集很困难。

② 造成内燃机零部件失效的影响因素很多,且各因素间也相互影响。几乎每一个零件都同时承受机械载荷、热载荷、摩擦磨损和腐蚀等的作用。

③ 分析期限很短。很多场合常常不允许进行细致的研究就要给出准确的分析结论,甚至提出切实可行的改进措施。

④ 内燃机的失效模式很多,分析的思路不尽相同,解决措施也大相径庭。需要掌握各种失效模式的特点,迅速缩小分析的范围,同时掌握不同类型失效的技术核心,这样才能提出有针对性的措施。

⑤ 涉及的领域很多,并且要深入到微观领域。

⑥ 关键性试样十分有限,往往只容许一次取样、一次观察和测量。

⑦ 试样由于失效进程、氧化、腐蚀的影响会失去原貌。

1.1.2 失效分析与评估的基本问题

1. 内燃机失效分析与评估涉及的学科知识

进行内燃机失效分析与评估不仅需要坚实的内燃机结构、原理、设计、加工、制造、使用及维修方面的专业知识,而且还要有金属物理、断口学、金相学,各种检测技术,各种力学(断裂力学、损伤力学),各种失效模式所涉及学科(疲劳、磨损、腐蚀、高温蠕变与松弛、氢脆等),以及各种诊断方法(模糊数学、故障树、神经网络、专家系统等)等方面的知识。因此,对复杂的失效,在很多场合仅凭一个人的力量是不能完成的,往往要借助于一个集多方面专家的诊断分析小组共同完成。而本书将重点结合内燃机的若干主要失效模式,从内燃机专业的角度进行失效分析。

2. 失效分析与评估人员的素养要求

失效分析与评估人员除了要具备上述学科知识外,还需要具备以下素养:

- ① 有毅力,勇于面对各种困难,知难而进。
- ② 具有实事求是的工作态度,公正中立,不受外界干扰。
- ③ 敏锐的观察力和熟练的分析技术,善于利用一切手段(设备)捕捉失效的信息和证据。
- ④ 正确的失效分析思路和较强的失效模式、失效原因判断能力,要有“医生的思路,侦探的技巧”。
- ⑤ 看问题全面,能够冷静地从整体上得到正确的判断。
- ⑥ 具有搜集情报的外交技巧,会借助文献和案例分析问题。
- ⑦ 善于学习。要善于从书本学习,向同行学习,特别是从实践中学习。
- ⑧ 知识面广,有丰富的工作经验。有较好的文字和语言表达能力。

3. 失效分析应当注意的问题、遵守的原则和运用的方法

(1) 注意的问题

进行失效分析时应当注意的问题如下:

① 有的放矢。失效分析的目的不同,分析对象的类别不同,分析的重点内容、进度、深度、思路 and 手段都有可能不同。如果是为了提高产品质量,那么失效分析的主要工作是根据失效模式,找出失效原因,以便有针对性地提出解决措施,研究的重点是后者——提出措施、防止再次失效。如果是为了事故的仲裁,那么找出事故原因,分清责任和损失将成为失效分析的主要工作,而工作的重点在于找失效的原因。

② 防止“以偏概全”。在失效分析过程中,有许多因素会影响分析人员全面分析问题。例如,失效现场提供的信息少、现场被破坏或看不到初始失效的图片资料、失效过程未知、个人的知识有限、当事人对失效信息的隐瞒甚至歪曲,等等。因此,在进行分析之前一定要尽可能收

集相关信息,掌握失效发生的过程,对复杂失效应该由不同学科的专家共同分析。

③ 深入现场。亲临现场调查,掌握第一手资料,这是失效分析的一条重要原则。这样才能通过现场调查、询问,掌握真实可信的资料,从而发现失效与环境、操作人员及维修保养等各方面之间的关系。

④ 计划周全。认真制订分析研究流程。仔细考虑失效的背景,研究它的特点,按照一般失效分析的要求,制订出一个能够获得充分必要信息和确凿证据的分析流程。尤其是破坏性的取样、清洗要慎重,注意制订正确的取样方案,尽可能不破坏失效痕迹。

⑤ 分析的数据要可靠,判断论据要充分,下结论要慎重,改善措施要可行。

(2) 遵守的原则

进行失效分析时应遵循以下五条基本原则:

① 整体观念。要将失效件、设备、环境、操作人看成一个整体,进行统一分析,尤其是要注意它们之间异常的相互关系。

② 立体性原则(时间-逻辑-知识)。在失效分析中要多方位地考虑问题。将失效零件的设计、生产、使用过程(时间维),失效分析所涉及的学科知识(知识维),以及失效问题的解决、判断过程(逻辑维)有机地结合起来进行综合考虑,如图 1-1 所示。

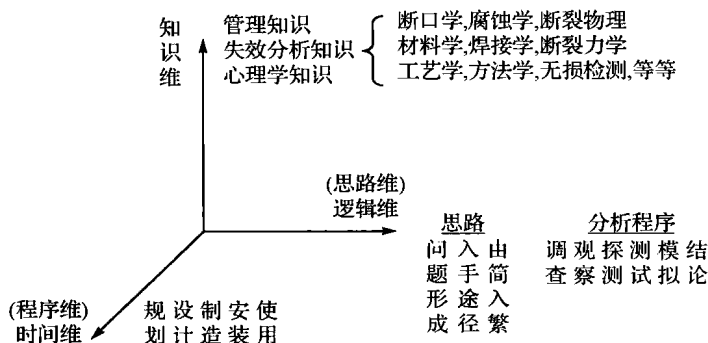


图 1-1 失效分析的“三维结构图”

③ 从现象到本质的原则。对于失效问题,能够得到的第一手资料就是失效的现象。但是,实际中同一种失效现象往往有多种失效原因。例如,同为疲劳贝壳花样的断口,而导致疲劳断裂的常见原因不少于 30 种。要注意通过失效现象(失效模式),进一步找出失效的原因。

④ 动态性原则。内燃机的失效绝大多数是在使用过程中出现的。在失效发生的过程中,其所承受的载荷、温度、湿度、环境、位置、磨损、腐蚀和操作人员等都是变动的,应该充分考虑到这些变化对失效的影响。

⑤ 两分法原则。这一认识论的重要原则用于失效分析,要求我们切勿形成固定思维,切勿单方面盲目相信、切勿轻信名牌和国外设备,切勿轻易下结论。

1.1.3 失效(故障)模式与分类

1. 失效模式

失效模式是指失效的外在表现形式和过程规律,一般可理解为失效的性质和类型。

2. 失效分类

绝大多数失效是在环境和各种载荷作用下,由形成的局部缺陷(裂纹、松动、磨损、老化等)逐渐发展而成的,其外在表现的特征模式千差万别,对内燃机来说,常见的失效模式可分为以下六大类:

① 损坏型失效模式 包括:断裂、碎裂、开裂、裂纹、点蚀、烧蚀、击穿、变形、拉伤、龟裂和压痕等。

② 退化型失效模式 包括:老化、变质、剥落和异常磨损等。

③ 松脱型失效模式 包括:松脱和脱落等。

④ 失调型失效模式 包括:压力过高或过低、行程失调、间隙过大或过小、干涉和卡滞等。

⑤ 堵塞与渗漏型失效模式 包括:堵塞、气阻、漏油、漏水、漏气和渗油等。

⑥ 性能衰退或功能失效型失效模式 包括:功能失效、性能衰退、公害超标、异响和过热等。

3. 本质故障与误用故障

本质故障是指内燃机本身的毛病而发生的故障。

误用故障是指因操作者失误而引起的故障。误操作还包括不正确的维修、调整、润滑和冷却等。

在可靠性设计时对易产生的误用故障需要特别关注,并加以防止。例如:内燃机的冷却水温过低、润滑油压力过低,控制系统应该限制内燃机的负荷超过规定值;压缩空气压力不足时,汽车不能起步;采用增大挂挡力或搬动特殊手柄的方法,防止误挂倒挡;在易误装配的地方设置专门的检查工序等。

4. 一次故障与二次故障(原发性故障与继发性故障)

最初发生的故障称为一次故障,由一次故障导致的故障称为二次故障。故障(失效)模式一般指一次故障的模式,而二次故障作为一次故障的后果。如果二次或更高次故障不可避免时,可以用二次故障作为故障模式,而将一次故障视为故障的原因。如何在一系列故障中判别哪一个是原发故障(一次故障)是失效分析很关键的技术。

1.2 内燃机失效分析的常规思路

1.2.1 常用的几种失效分析思路

常用的几种失效分析思路如下:

- ① “撒大网”逐个因素排除法;
- ② 以设备制造全过程为一系统进行分析;
- ③ 根据部件失效模式分析;
- ④ 根据裂纹产生背景分析;
- ⑤ 根据部件工作条件分析;
- ⑥ 根据部件和设备类别分析;
- ⑦ 不合格产品分析。

1. “撒大网”逐个因素排除法

“撒大网”逐个因素排除法需要把人(man)、设备(machine)、材料(material)、方法(method)、管理(management)、环境(environment)当做一个系统来对待并进行分析,因此该方法又称为5M1E法。

操作人员作为可靠性链上的一个环节,有很大的局限性。例如,人事管理差错以及人的可靠性、耐疲劳性、健康标准、饮酒、疾病和责任心等因素都会导致不安全的行为。

- ① 缺乏经验,表现为判断错误;
- ② 无知和训练不够,反应迟钝,表现为技术低劣;
- ③ 主观臆断,违章操作,表现为违抗指令或规程;
- ④ 生理缺陷或心理状态不佳,表现为粗心大意;
- ⑤ 工作态度不好,缺乏责任心,表现为玩忽职守。

环境的变化对失效影响很大。例如,温度、载荷变化速度的高低会影响断裂形式。高温低速容易形成晶间断裂,而低温高速容易形成穿晶断裂。拉伸速度达到45~55 m/s,塑性材料也会表现出脆性断裂。

容易造成损伤的环境因素包括:

- ① 腐蚀性气氛介质;
- ② 高温或温度梯度过大;
- ③ 低温;

- ④ 海洋气氛；
- ⑤ 碱性溶液；
- ⑥ 氨气氛；
- ⑦ 润滑介质不合适；
- ⑧ 润滑剂变质或污染；
- ⑨ 流体介质中含有磨粒；
- ⑩ 控制或规定的环境不适当。

2. 以设备制造全过程为一系统进行分析

对于纯设备、零部件问题,以设备制造的全过程(规划、设计、选材、铸造、机械加工、热处理、二次精加工、运输、储存、装配、检测、磨合、使用环境、保养和维修)进行详细分析,以便发现引起失效的原因。

3. 根据部件失效模式分析

根据失效现象、断口等信息判断失效模式,根据失效模式进一步分析原因。

如表 1-1 所列为零部件较为常见的失效模式。

表 1-1 零部件常见失效模式

过量变形	①热膨胀变形或力和温度引起的变形;②屈服;③压痕;④蠕变;⑤冲击变形	
表面损伤	磨 损	①粘着磨损;②磨粒磨损;③腐蚀磨损;④变形磨损;⑤冲击磨损;⑥微动磨损;⑦接触疲劳磨损;⑧剥落
	腐 蚀	①均匀腐蚀;②缝隙腐蚀;③电化学腐蚀;④点腐蚀;⑤晶间腐蚀;⑥选择浸出;⑦冲蚀;⑧气蚀;⑨氢损伤;⑩生物腐蚀;⑪应力腐蚀;⑫微动腐蚀
断 裂	延性断裂	
	脆性断裂	
	冲击断裂	
	疲劳断裂	①高温疲劳;②低温疲劳;③热疲劳;④高循环疲劳;⑤低循环疲劳;⑥接触疲劳;⑦冲击疲劳;⑧腐蚀疲劳;⑨微动疲劳;⑩蠕变疲劳
	应力持久断裂	
	蠕变-疲劳复合断裂	

同一失效模式,往往有很多诱发原因。如表 1-2 所列,仅引起疲劳失效的因素就非常多,因此只通过失效现象来确定失效模式是远远不够的,必须进一步分析、监测、诊断其具体的原因。

表 1-2 金属部件疲劳失效的诱发原因

外 因	工作条件	加载频率	①低周高应力；②频繁断续加载
		超转速	
		工作温度	①过低或过高；②波动大；③热冲击；④蠕变疲劳
		环境介质	①腐蚀性气氛介质；②碱性溶液；③点腐蚀；④环境氢；⑤润滑剂不合要求；⑥应力腐蚀
		使用载荷集中	
		载荷谱状况	
		非零平均应力 	
	振蚀(微振磨损、微动腐蚀、微动疲劳)		
累积损伤			
内 因	材料化学成分不合格		
	宏观组织的均匀性不合格		
	金相组织不合格	①晶粒粗大或混晶；②存在魏氏组织；③带状组织严重；④氧化物夹杂不合格；⑤皮下碳化物聚集	
	材料内部缺陷	①冶炼；②铸造；③锻造；④焊接	
	热处理缺陷		
	机械加工引起的 (包括设计的)缺陷	①表面加工粗糙；②表面擦伤、划伤；③表面残余拉应力；④校直不当造成的残余拉应力；⑤压印标记造成的残余拉应力；⑥开孔位置错误；⑦倒角尖锐；⑧电弧烧伤应力集中；⑨焊点应力集中；⑩外形截面突变.....	

4. 根据裂纹产生背景分析

失效件(或其局部)都有其制造、工作运行的背景,可以通过分析其中的各个环节(包括人为的因素)寻找失效的原因。

5. 根据部件工作条件分析

根据失效件的服役条件分析,寻找可能导致失效的诱发因素。四大类诱发因素包括:力、时间、温度和活性环境。

6. 根据部件和设备类别分析

同类部件往往具有相近的失效模式,不同的设备也有其常见失效类型和失效原因。该方法是以类比或专业经验为基础进行的同类部件(轴类、轴承、齿轮)、设备的失效分析。

7. 不合格产品分析

未出厂的不合格产品往往已经反映出了一些失效的诱发因素,逆向而上逐段检查有关生