

航空经济论丛
丛书主编 张 宁

航空发动机视情维修管理中的寿命预测技术

Aero-engine Life Prediction Technology in Condition Based Maintenance Management

任淑红 著



经济科学出版社
Economic Science Press

航空经济论丛

丛书主编 张 宁

航空发动机视情维修管理中的寿命预测技术

Aero-engine Life Prediction Technology in Condition Based Maintenance Management

任淑红 著



经济科学出版社
Economic Science Press

图书在版编目 (CIP) 数据

航空发动机视情维修管理中的寿命预测技术 / 任淑红著.
—北京: 经济科学出版社, 2015. 8
(航空经济论丛)
ISBN 978 - 7 - 5141 - 2903 - 8

I. ①航… II. ①任… III. ①航空发动机 - 运行
寿命 - 预测技术 IV. ①V263. 6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 133042 号

责任编辑: 王冬玲
责任校对: 刘 昕
责任印制: 邱 天

航空发动机视情维修管理中的寿命预测技术

任淑红 著

经济科学出版社出版、发行 新华书店经销

社址: 北京市海淀区阜成路甲 28 号 邮编: 100142

总编部电话: 010 - 88191217 发行部电话: 010 - 88191522

网址: [www. esp. com. cn](http://www.esp.com.cn)

电子邮件: [esp@ esp. com. cn](mailto:esp@esp.com.cn)

天猫网店: 经济科学出版社旗舰店

网址: [http: //jjkxcs. tmall. com](http://jjkxcs.tmall.com)

北京汉德鼎印刷有限公司印刷

三河市华玉装订厂装订

787 × 1092 16 开 9 印张 200000 字

2016 年 5 月第 1 版 2016 年 5 月第 1 次印刷

ISBN 978 - 7 - 5141 - 2903 - 8 定价: 35.00 元

(图书出现印装问题, 本社负责调换。电话: 010 - 88191502)

(版权所有 侵权必究 举报电话: 010 - 88191586)

电子邮箱: [dbts@ esp. com. cn](mailto:dbts@esp.com.cn))

总 序

中国经济的改革和开放已走过三十多个春秋。这是一段让中国人物质生活和精神意识产生剧烈变更的岁月，也是中国经济学探索和研究最为活跃、作用最为显著的时期。

区域经济发展是发展经济学研究的一个重大领域。谈及区域经济、区域发展，人们经常聚焦社会经济历史的发展趋势、发展道路、发展模式、发展动因和特点等问题，诸如，发达地区经济如何长期稳定发展，并保持优势地位？落后地区经济如何跨越式发展，实现赶超？如何打造区域经济的新增长极？等等。

经济社会发展至今，如何提高产业自主创新能力，走新型工业化道路，推动经济发展方式转变，成为关系我国经济发展全局的战略抉择。因此，我们急需一种具备附加值高、成长性好、关联性强及带动性大等特点的经济形态即高端产业来引领、带动和提升。郑州航空港经济综合实验区作为中原经济区的核心层，完全具备了这个能力。在全球经济一体化和速度经济时代，航空经济日益成为在全球范围内配置高端生产要素的“第五冲击波”，成为提升国家和区域竞争、促进经济又好又快发展的“新引擎”。

2013年3月17日，国务院正式批准《郑州航空港经济综合实验区发展规划（2013~2025年）》（以下简称《规划》），这标志着中原经济区插上了腾飞的“翅膀”，全国首个航空港经济发展先行区正式起航了。

《规划》的获批既是河南发展难得的战略机遇，也是作为河南航空经济研究中心的依托单位——郑州航空工业管理学院千载难逢的发展良机。

目前,在我国航空经济发展研究中,以介绍、评述和翻译国外研究成果居多,航空经济发展的理论基础研究尚未引起足够的重视。河南航空经济研究中心、航空经济发展河南省协同创新中心编撰航空经济系列丛书,正是针对这一重要课题而进行的学术研究的有益探索。

郑州航空港经济综合实验区的建设是一个巨大的、先行先试的创新工程,系列丛书也是一个理论和实践相结合的创新。因此,丛书中还有很多值得进一步探索和完善的地方。但瑕不掩瑜,丛书的出版对认识发展航空经济的意义,对了解航空经济发展的实践,对厘清航空经济的发展思路具有重要的现实意义。希望丛书能服务于郑州航空港经济综合实验区的建设!

特向读者推荐!

张 宇

2013 年 8 月

前 言

作为飞机心脏的发动机，其健康状况对保证飞机安全和降低航空公司的运营成本具有重要意义。发动机的可靠性评估在发动机的整个设计、制造、使用、维护等各个阶段都非常重要，精确的可靠性评估可以有效地指导发动机的使用和维修管理任务，为提高飞机安全经济运营奠定基础。传统可靠性理论必须依据失效数据对产品进行可靠性评估，然而，对于发动机而言，在允许的时间内很难获取足够的失效数据。因此，极少失效甚至零失效下的发动机可靠性评估已成为航空领域所面临的关键问题。而 20 世纪末兴起的以性能退化数据为基础的性能可靠性分析理论和方法为解决上述问题提供了有效途径。

本书以此为背景，结合航空发动机使用维护过程中所采集的性能数据，以性能可靠性分析理论为基础，深入研究了发动机的性能可靠性评估理论和方法。全书共分为六章，主要内容如下：第 1 章介绍了航空发动机的性能可靠性分析原理及其在航空安全领域中的重要意义，分析了目前传统的可靠性分析方法与航空发动机可靠性评估中存在的几个关键问题及解决的思路；对性能可靠性分析评估的方法以及其中几个关键问题的国内外研究现状进行了综述，指出了解决问题的技术理论研究现状。第 2 章研究了基于性能数据的航空发动机机队可靠性评估方法，根据航空发动机使用过程中的性能退化信息，通过影响因素分析，结合随机过程理论，同时，通过分析性能退化过程与失效分布之间的关系，建立了航空发动机达到失效阈值的失效分布，从而可以对发动机机队的可靠性进行评估。第 3 章研究了单性能参数条件下航空发动机在翼寿命预测模型。传统的寿命预测方法都是建立在大量的寿命信息的基础上，而对于高可靠性的航空发动机，很难搜集到足够多的失效数据，然而发动

机使用过程中的性能退化信息中包含大量与寿命紧密相关的信息。故以性能可靠性分析理论为基础,对投入使用但尚无寿命信息的航空发动机的寿命预测方法进行了研究。第4章提出了基于多性能参数的航空发动机实时性能可靠性评估方法和寿命控制方法,较之传统可靠性评估方法仅能得到发动机机群平均可靠度水平而言,此方法可以对单台发动机的性能可靠性进行实时评估,根据每台发动机不同的性能可靠度水平进行寿命控制。第5章研究建立了多失效模式共存的航空发动机可靠性评估模型。该方法能够给出航空发动机在一定时期内哪种失效模式更容易引起失效或者某种失效模式出现的概率,为航空公司能够及时掌握发动机的健康状态,有针对性地进行发动机的维修计划安排以及更加灵活的机队管理提供了科学理论基础。第6章结合航空公司实际工程需求,构建了民航发动机集成维修管理系统,实现民航发动机的状态监测、寿命控制、维修决策与资源调度。此系统也是上述可靠性评估与寿命预测方法的验证,正逐步应用于航空公司的发动机日常工程管理中,应用效果非常显著,有效地提高了发动机的维修管理水平。

本书在内容的安排和叙述上,力图做到由浅入深,循序渐进,逻辑严密,推导论证细致,语言流畅易懂、精炼准确,在充分讲清基本概念的基础上,符合认识规律,便于从事航空发动机可靠性分析,寿命预测以及维修工程领域的科研人员阅读,也可供相关专业的研究生参考。

本书是以航空发动机可靠性分析和寿命预测技术的前沿性和适用性为原则,根据作者多年从事航空发动机可靠性分析和寿命预测的研究成果并参考该领域最新的研究进展和相关文献撰写而成。

由于本书的研究领域涉及多个学科交叉,该技术发展迅速,限于作者的学识水平,书中疏漏及不当之处在所难免,敬请广大读者批评指正!

作者

2015年1月于郑州

目 录

第1章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 目前存在的问题	2
1.3 研究现状与发展趋势	5
1.3.1 性能可靠性分析原理	5
1.3.2 基于单性能参数的可靠性分析技术	8
1.3.3 基于多性能参数的可靠性分析技术	12
1.3.4 航空发动机在翼寿命评估技术	12
1.3.5 基于多失效模式共存的可靠性分析技术	14
1.4 本书主要内容	15
第2章 基于性能数据的航空发动机机队可靠性评估	18
2.1 概述	18
2.2 航空发动机主要性能监测参数分析	19
2.2.1 巡航监控参数	19
2.2.2 发动机排气温度裕度 (EGTM) 定义	19
2.2.3 影响 EGTM 的因素分析	20
2.3 航空发动机性能数据的分析	22
2.3.1 性能数据预处理	22
2.3.2 性能数据中不完全寿命数据的可靠度计算	23
2.4 基于带漂移的布朗运动的航空发动机 EGTM 性能退化量模型	25
2.4.1 基于带漂移的布朗运动的概念及性质	25
2.4.2 基于带漂移的布朗运动的航空发动机性能退化量	

模型的建立	32
2.4.3 EGM 性能符合带漂移的布朗运动的检验	33
2.5 航空发动机机队可靠性评估模型	34
2.5.1 可靠性评估模型的建立	34
2.5.2 模型中未知参数估计	36
2.5.3 实时可靠性评估模型的修正	37
2.6 实例分析	37
2.6.1 带漂移的布朗运动的检验	38
2.6.2 可靠度函数的建立	39
2.6.3 可靠性评估模型的检验	40

第3章 单性能参数条件下航空发动机在翼寿命

预测方法研究	42
3.1 概述	42
3.2 基于贝叶斯更新方法的航空发动机在翼寿命预测模型	43
3.2.1 贝叶斯统计推断	43
3.2.2 具有一般独立同分布随机误差项的随机参数线性退化量模型	45
3.2.3 具有布朗运动误差项的随机参数线性退化量模型	48
3.2.4 模型实现	50
3.3 基于时间序列方法的航空发动机在翼寿命预测模型	53
3.3.1 时间序列方法简介	53
3.3.2 基于时间序列方法的航空发动机在翼寿命预测模型实现	54
3.4 基于免疫粒子群的航空发动机在翼寿命组合预测模型	60
3.4.1 航空发动机在翼寿命组合预测模型描述	60
3.4.2 组合预测模型描述	60
3.4.3 免疫粒子群优化算法	61
3.4.4 航空发动机在翼寿命组合预测实现	63

第4章 多性能参数条件下的航空发动机在翼寿命

预测方法研究	65
4.1 概述	65

4.2 状态空间模型和卡尔曼滤波算法	66
4.2.1 状态空间模型	66
4.2.2 卡尔曼滤波理论	69
4.3 基于卡尔曼滤波算法的时变参数退化量模型	72
4.3.1 时变参数退化量模型的状态空间表示	72
4.3.2 时变参数估计的卡尔曼滤波递归算法	73
4.3.3 时变参数退化量模型的建立	74
4.4 基于多参数的航空发动机性能退化失效模型	80
4.4.1 随机行走过程	80
4.4.2 多维正态随机变量的性质	80
4.4.3 基于多参数的航空发动机性能退化失效分析	81
4.4.4 实时性能可靠度函数曲线	83
4.5 基于性能可靠性的航空发动机在翼寿命控制	85
4.5.1 基于性能可靠性的航空发动机实时可靠在翼寿命预测	85
4.5.2 航空发动机在翼寿命控制	86
第5章 多失效模式共存下的航空发动机使用可靠性评估	88
5.1 概述	88
5.2 航空发动机在翼寿命影响因素分析	89
5.3 航空发动机典型失效模式失效模型的建立	91
5.3.1 三类典型失效模式失效数据的收集整理	91
5.3.2 协变量主成分分析	93
5.3.3 基于比例危险模型的典型失效模式的失效分布函数的建立	95
5.3.4 误差分析	97
5.3.5 模型实现	98
5.4 基于多失效模式共存的航空发动机使用可靠性评估	99
第6章 民航发动机视情维修管理系统开发	104
6.1 概述	104
6.2 系统的总体设计	104
6.2.1 系统需求与应用目标	104
6.2.2 系统的功能模块	105
6.3 航空发动机可靠性评估和下发预测的流程	106

4 航空发动机视情维修管理中的寿命预测技术

6.3.1 航空发动机可靠性评估流程	106
6.3.2 航空发动机下发预测流程	107
6.4 系统的具体实现	108
6.4.1 系统开发平台简介	108
6.4.2 数据库设计	108
6.4.3 系统软件界面	109
附录	115
参考文献	126

第1章 绪 论

1.1 引 言

伴随科学技术的日新月异和全球经济的蓬勃发展,我国航空运输业也在迅猛发展。目前我国自主研制新型民用飞机 ARJ21 飞机已经首飞成功,进入取证阶段,而 C919 大型客机的研制也在紧锣密鼓地进行。对于飞机的核心动力航空发动机而言,其安全性和可靠性评估问题成了目前航空研究领域的焦点。据统计,自 1994~2000 年世界航空运输共发生 279 起飞行事故,其中因发动机故障导致的飞行事故约占到 20%^[1-2],由此可见,航空发动机的安全性与可靠性评估对于飞行安全而言是至关重要的。

可靠性是指产品在规定的条件下,规定时间内,完成规定功能的能力,是对产品无故障工作能力的度量。可靠性分析与评估是可靠性分析工程中非常重要的一部分,是指在产品的寿命周期内,根据产品的可靠性分布模型、结构,以及相关的可靠性信息,利用统计方法,对产品的可靠性指标做出估计的过程^[3]。科学的可靠性评估方法不仅可以减少试验经费,提高分析结果的准确性,而且缩短了研制周期,成为现代工业生产所必需的工具。然而传统的可靠性分析技术的分析对象是失效数据,随着损伤容限和安全性设计理念以及各类高新制造技术的应用,使得民航发动机已成为一类高度集成的、价值昂贵的、强非线性的复杂机电液系统,其可靠性越来越高,很难在短期内获得足够的失效数据,因此无法有效的利用传统可靠性理论对发动机进行可靠性评估。

由于传感器以及监测技术的迅速发展,在航空发动机的使用过程中,积累了大量与寿命信息相关的性能监测信息数据,这类信息数据已成为目前研究高可靠、长寿命设备可靠性分析非常有力的工具。本书正是鉴于此,借助航空发动机丰富的性能监测信息,以性能可靠性分析理论为基础,全面深入研究了航空发动机可靠性评估方法与分析技术。

1.2 目前存在的问题

作为飞机“心脏”的民航发动机的制造水平往往代表着当代最前沿的高新技术水平。面对这一高度集成的复杂系统,如何提高民航发动机运行可靠性、安全性和维修经济性正成为航空公司、发动机制造商和维修厂家共同关注的焦点问题。由于新材料、新技术的不断出现,不允许反复对发动机进行长周期、高费用的试验,且航空发动机系统结构越来越复杂,如果不解决可靠性问题,系统功能就失去了意义,这就需要将可靠性分析贯穿于研制、使用和维修的全过程。

在可靠性理论中,将产品丧失规定功能的现象称为失效,产品失效通常是由外部环境、工作条件以及产品内在的失效机理共同作用的结果,这通常是一个非常复杂的变化过程。根据文献[4],大致可以将产品的失效机理分为两大类:①过应力机理,②耗损型机理。对于第一种,如果应力低于产品的强度,则对产品不会造成影响,如果应力超过产品所能承受的强度,则产品便会发生失效;对于第二种,在产品使用过程中,应力会对产品造成一定的损伤,而且损伤会随着使用时间逐渐累积,最终导致产品功能逐渐退化,或结构、内部材料等抗应力强度发生退化,当其强度或功能退化到极限程度时,产品便会发生失效。

通过以上介绍可知,由于发动机是复杂大系统,其失效是由多种失效模式相互竞争的结果。在发动机的使用过程中,在某一时刻的某一瞬间,有可能其功能突然完全丧失,如外来物损伤、材料断裂等;也有可能随时间的延长其功能会逐渐缓慢下降,直至无法正常运行的状态,如排气温度升高超过警戒值、滑油泄漏、高压转子转速偏高等。

而目前可靠性分析方法还是以传统可靠性分析理论为主,都是通过大量试验得到系统或部件的失效数据,然后利用统计判断准则,选择最合适的寿命概率分布模型(主要是正态、对数正态、威布尔、指数等传统寿命分布),最后通过部件寿命分布模型和系统可靠性结构模型,得到产品的可靠性。而且其分析是基于大量失效数据的基础上,其分析结果反映的是在给定条件下总体的“平均属性”。另外,在分析过程中,没有区分不同的失效机理,不注重使用过程中产品的微观变化,假定产品只具有两种状态:正常、失效,不管其是否具有容错能力,产品的正常与失效状态之间都具有明显的界限划分,产品“非好即坏”,没有充分利用产品失效前的相关信息。

这种分析方式比较适合于技术复杂性比较低的产品,对于高可靠、长寿命、

结构复杂的航空发动机,其利用传统可靠性分析方法进行可靠性分析却显得有些力不能及,主要表现在以下几个方面:

第一,作为高新技术产品的航空发动机,其研制经费高昂,而且由于其高可靠、长寿命的特点,所需要的试验时间也是相当长的。但实际上,由于研制经费和时间的限制,不可能进行大量的寿命试验,以满足传统可靠性分析所需的大样本量。

第二,传统可靠性分析技术是以失效时间作为统计分析对象的,不能充分利用在发动机的使用过程中获得的关于发动机寿命和可靠性的重要信息。

第三,航空发动机状态受工作环境的影响,大多数情况下其环境复杂多变,但传统可靠性(逻辑)模型是建立在独立性假设基础上的,无法刻画环境的动态、实时特性以及多种因素复杂相关性对发动机可靠性的影响,导致了可靠性预测结果与实际情况相差较大;并且当发动机的某些特性或其运行环境改变后,得到的寿命分布模型可能变得无效,需重新进行建模分析。

第四,航空发动机是由多个部件组成的复杂大系统,存在气路性能衰退、疲劳、磨损等多种失效模式,可以将其分为两大类:退化失效和突发失效。退化失效是发动机下发的主要原因之一,而传统可靠性理论侧重研究突发失效。

由以上分析可知,随着科技的发展,可靠性水平的不断提高,传统的可靠性分析方法越来越不能满足工程实践的需要,急需发展更为有效的可靠性评估方法。

随着我国航空市场的迅猛发展,行业内外竞争日趋激烈。为了满足航空运行安全、快捷的市场需求,航空公司和制造商都越来越重视航空发动机的可靠性和维修性指标。国际上三大发动机厂商相继开发了相应的发动机健康状态监控软件分别为普惠的 EHM 系统、通用公司的 SAGE 系统、罗罗公司的 COMPASS 系统。其发动机的性能状态监控内容主要包括以下三项内容:

(1) 气路性能监控。其中包括:发动机排气温度、压力、转子转速、燃油流量等。

(2) 滑油监控。其中包括:滑油磨粒监控、滑油平均消耗率监控、滑油温度和压力监控、滑油品质状况监控。

(3) 振动监控。其中包括:高低压转子的振动偏移量等。

由于航空发动机规定完成的功能是由其性能参数表征的,并且动态环境对发动机的影响也体现在性能参数的变化上,很多情况下,性能衰退是航空发动机下发的主要原因之一。而且发动机性能退化过程中包含着大量有用、可信而又精确的与发动机寿命有关的关键信息,所以结合以上性能监控手段,从发动机性能参数的变化着手,通过收集表征发动机功能的某些性能退化数据,利用退化数据对发动机功能的退化过程进行分析,就可以对发动机可靠性做出评定。利用性能退

化数据进行可靠性分析是一个有重要意义的课题,这种分析方法可以解决传统可靠性与工程实际不相适应的问题。

本书正是基于以上考虑,针对航空发动机可靠性分析与评估技术中的关键问题,以性能可靠性分析理论为基础,从发动机性能参数的变化着手,进行了深入研究,具体而言:

在航空发动机可靠性评估方面,主要存在极少失效或者零失效的情况。在航空发动机的实际运营过程中,由于其高可靠、长寿命的特点,很难收集到足够多的失效数据进行可靠性分析。并且,受复杂的工作环境的影响,使得发动机的状态变化具有非常强的随机性,传统的可靠性分析方法很难加以描述。因此,在发动机的使用过程中如何对其进行可靠性评估成为亟待解决的关键问题。通过航空公司搜集到的实际数据表明,航空发动机起飞阶段的排气温度裕度(Exhaust Gas Temperature Margin, EGTM)是发动机换发的主要原因之一,即当起飞 EGTM 衰退到其阈值时,便会下发。因此,根据性能可靠性分析理论,通过监测软件收集到的起飞性能参数 EGTM 是受环境影响后的数据,参数本身就反映了环境的影响,其参数变化具有随机性特点,因此可以通过分析起飞 EGTM 的衰退趋势,来评估发动机机队的可靠性水平。以下为了简便起见,如无特殊说明,下面所提到的 EGTM 都是指起飞阶段的 EGTM。

在航空发动机在翼寿命预测方面,大部分依据传统可靠性分析理论,通过收集到的失效数据,利用数理统计和概率论方法,使用统计推断准则,选择最合适的传统寿命概率分布模型(主要是正态、对数正态、指数、威布尔等),最后通过部件寿命分布模型和系统可靠性结构模型,得到发动机机队的平均在翼期望寿命。然而在航空公司的实际操作过程中,其不仅关心整个机队的平均在翼寿命和可靠性水平,更加关心每台发动机的健康状况和在翼寿命,以便合理安排发动机拆换时间以及后续的维修工作,这是通过传统可靠性分析理论很难实现的。而通过监控软件获得的性能监测参数,根据每台发动机本身的差异以及工作环境的不同而不同,其性能参数反映了每台发动机的个体差异性。因此,可以从每台发动机的性能监测参数着手,通过分析建立每台发动机基于性能衰退的失效分布模型,达到单台发动机在翼寿命预测的目的。

在航空发动机性能可靠性分析过程中,我们发现基于单参数的可靠性评估很难全面的评估发动机整机性能可靠性。由于航空发动机是高度集中的复杂大系统,其由多个子系统组成,子系统与子系统之间相互关联,各性能监测参数之间相互影响,使得发动机整机性能可靠性评估显得尤为艰难。而大部分在研究基于多参数的性能可靠性分析过程中,都假设各性能参数间是相互独立的,这一假设忽略

了各个参数之间的相互影响,使得可靠性评估结果脱离了工程实际,无法准确的描述发动机实际的可靠性水平。因此,有必要研究基于各性能参数具有相关性的航空发动机性能可靠性评估方法。

在航空发动机整机系统安全风险评估过程中,其不仅具有气路性能衰退这一种失效模式,同时还存在磨损、疲劳、腐蚀、外来物损伤、滑漏等多种失效模式,且各失效模式间具有相互影响。如何科学合理的处理各失效模式间的相互影响,成为全面评估航空发动机整机系统的可靠性的关键问题。因此,我们可以通过分析各失效模式间的相互影响,建立基于多失效模式共存的航空发动机可靠性评估模型,从而全面评估航空发动机整机系统的安全风险,为发动机以后的可靠性设计提供依据。

1.3 研究现状与发展趋势

1.3.1 性能可靠性分析原理^[5]

1. 退化量模型

一般的退化量统计模型是在考虑退化量测量值 $y(t)$ 与真实值 $x(t)$ 之间存在误差的基础上建立起来的,如下所示:

$$y(t) = x(t) + \varepsilon \quad (1-1)$$

其中 ε 为测量误差,如果测量误差可以忽略,则 $y(t) = x(t)$; 如果无法忽略,则假设 $E[\varepsilon] = 0$, $\text{Var}[\varepsilon] = \sigma^2$, 且 ε 与 $x(t)$ 相互独立。

而在性能可靠性分析理论中,我们将设备的退化过程看作为一个随机过程,即 $\{x(t)\} (t \geq 0)$ 为一个随机过程。则其分布为:

$$G(x, t) = P\{x(t) \leq x\} \quad (1-2)$$

假设它的一维密度 $g(x, t)$ 存在,则根据一般密度函数的性质及性能退化失效机理,其具有以下性质:

$$(1) \text{ 对任意的 } t, \int_{-\infty}^{+\infty} g(x, t) dx = 1;$$

$$(2) \lim_{t \rightarrow \infty} g(x, t) = 0, \text{ 且在有限区间 } [a, b] \text{ 内, } \lim_{t \rightarrow \infty} \int_a^b g(x, t) dx = 0, \text{ 但仍有 } \lim_{t \rightarrow \infty}$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} g(x, t) dx = 1。$$

假设 1: 随着时间 t 的变化, 退化量分布函数 $G(x, t)$ (或者密度函数 $g(x, t)$) 的分布类型不变, 只是其中的参数发生变化。

通常 $G(x, t)$ 可取正态、对数正态、威布尔 (Weibull) 等。退化量 $x(t)$ 的均值 $E[x(t)]$ 一般反映的是总体的退化规律, 而退化量的方差 $\text{Var}[x(t)]$ 则反映的是性能退化过程中个体间差异的变化情况。

2. 退化失效模型

根据退化失效的定义, 假设 t 时刻设备的退化量为 $x(t)$, 随时间变化, 当 $x(t)$ 达到失效阈值 L 时, 设备失效, 其对应的时间为设备的寿命 (或失效时间), 即可以规定退化量 $x(t)$ 首次达到失效阈值时设备失效, 因此我们可以定义设备退化失效的寿命为:

$$T(L) = \inf\{t; x(t) = L; t \geq 0\} \quad (1-3)$$

根据寿命变量的定义, 设备的失效分布函数为:

$$F(t|L) = P\{T(L) \leq t\} \quad (1-4)$$

以上完整的描述了设备退化失效的统计规律, 称上式为退化失效模型。

根据退化失效的定义, 我们可以导出退化量分布函数与退化失效模型的关系, 当退化量呈上升趋势时有:

$$F(t, L) = P\{T(L) \leq t\} = P\{x(t) \geq L\} = 1 - G(L, t) \quad (1-5)$$

假设设备的失效分布密度函数为 $f(t, L)$, 失效分布与退化量分布之间的关系如图 1-1 所示。退化量下降时的情况类似。在不至于引起混淆的情况下, 一般将 $F(t, L)$ 和 $f(t, L)$ 分别写成 $F(t)$ 和 $f(t)$ 。

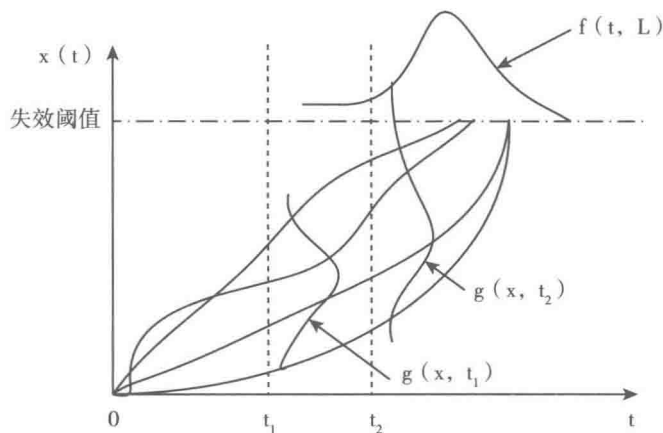


图 1-1 设备失效分布与退化量分布关系