

机车维修工程

吴 庄 胜 编 著



西南交通大学出版社

前 言

随着科学技术的不断进步,铁路运输正向着高速、重载、安全、舒适的方向发展,机车也向着大型、高速、机构复杂、结构轻型、自控自检、故障诊断、机电一体化方向发展。机车的维修工作正面临着新的挑战。首当其冲的是传统的维修思想、维修理论及其指导下的维修体制和维修制度亟待改革和发展。以预防为主的维修思想逐渐转向以可靠性为中心的维修理论,机车的维修贯穿于机车寿命的全部过程,包括机车的设计、制造、运用和维修等过程。机车的可靠性和维修性是其固有的设计制造特性,机车维修的中心任务是应用现代化手段充分利用其维修性消除机车的损伤,维护其固有的可靠性。机车维修生产系统及其现代化也是机车维修课程的主要内容。为了推进机车维修学科的发展,面向21世纪培养铁路机务管理和机车运用维修人材,特编写此教材,供高等院校机车运用与相关专业、铁路机务系统与机务段以及从事机车车辆、机械设备设计、制造、管理与维修的工程技术人员使用。

机车维修工程是一门综合性的学科,涉及的知识面广。本书加强了机车维修理论基础知识,运用可靠性理论和系统工程的观点,开拓了维修思想、可靠性、维修性、维修管理等领域。主要介绍机车的故障理论、零件的损伤、极限状态的确定,这些都是指导宏观维修决策的理论基础;机车的维修性、维修思想和维修制度、维修保障系统及维修管理是从系统的观点和对机车全寿命管理的角度出发阐述维修决策问题;机车检修工艺与检修技术、检修设备和检修基地都是具体的维修组织、修理工艺流程和维修工程设计。本书在内容上以内燃机车的维修为主,兼顾电力机车的维修。本书还对高速动车组的维修及维修基地的设计作了简要的介绍。在基础理论上适用于普通机械和机电产品的维修工程,也是机械设计人员必备的基础理论知识。

本书通过了西南交通大学“211工程”办公室组织的专家评审。本书的出版获得西南交通大学出版基金的资助,对他们辛勤的工作表示衷心的感谢!

本书在编写过程中,得到老前辈霍庶辉、王夏蓓、鲍维千教授的支持和帮助,获得赵清教授等“高速列车检修技术研究”课题组全体同志的帮助,在此深表谢意。

由于编者水平有限,错误和不当之处在所难免,恳请读者不吝指正。

作 者

一九九七年八月于西南交通大学

目 录

第一章 机车的可靠性与故障理论	1
第一节 机车的故障.....	1
第二节 故障的统计特征与故障规律.....	3
第三节 可修复系统的可靠性	11
第二章 机车的维修性和有效度	15
第一节 维修性与维修性指标	15
第二节 机车及其产品设备的有效度	18
第三节 机车产品的维修性设计	21
第三章 机车零部件的损伤	23
第一节 磨损	23
第二节 蚀损	28
第三节 疲劳	30
第四章 制订机车维修制度的基本原理	35
第一节 维修思想	35
第二节 维修方式	38
第三节 维修制度	40
第四节 使用期限与极限技术状态	44
第五节 机车零件的耐磨寿命与可靠性评价	51
第六节 机车寿命分布的综合分析	57
第七节 制订修理周期结构的基本方法	58
第五章 机车检修方法与检修技术	64
第一节 尺寸链原理和保证组装精度的方法	64
第二节 零件修复方法及其选择	74
第三节 机件的清洗	81
第四节 零件的检验	89
第五节 故障诊断技术及其对维修制度的影响.....	101
第六章 机车维修管理	108
第一节 机车维修生产系统.....	108
第二节 机车维修信息管理.....	111
第三节 机车维修计划的管理与控制.....	115
第四节 机车维修备件的库存管理.....	121
第五节 确定零部件的投产顺序.....	127
第六节 机车维修质量管理.....	133

第七章 机车检修工艺与维修保障系统	138
第一节 机车检修工艺过程概述	138
第二节 维修保障系统概述	142
第三节 机车检修中的流水作业组织	146
第四节 机车整备作业与主要设备	150
第五节 机车架修作业与主要设备	152
第六节 轮修定修作业过程与主要设备	162
第七节 柴油机检修及检修间	166
第八节 维修基地的规划与设计	176
第八章 高速列车的检修	182
第一节 高速动车组及其检修特点	182
第二节 高速动车组的配属量检修工作量与检修库线的计算	187
第三节 高速动车组的检修基地与主要检修设备技术	190
第九章 机车检修新技术	199
第一节 成组技术	199
第二节 网络计划技术	206
第三节 计算机辅助生产计划—MRP 系统	214
第四节 ISO9000 国际质量认证标准系列简介	219
参考文献	225

第一章 机车的可靠性与故障理论

第一节 机车的故障

在机车、车辆、高速动车组的检修工作中,研究故障的目的是为了故障诊断、故障预报、查明故障模式、研究故障机理、排除故障和探求改进设计的方法,以减少或消灭故障的发生、提高可靠性和有效利用率。

一、故障的概念

1. 故障的定义

对于产品一般可分为可修复产品和不可修复产品两大类。不可修复产品是指产品发生故障以后不进行维修而报废的产品。其中包括有的产品技术上不便进行维修,一旦产生故障只有报废,如灯泡;有的产品是价格低廉的消耗品,维修很不经济;有的就是一次性使用,如电容器等,不存在维修问题的产品。在机车车辆中属于这类产品的,如轴承、活塞环、油封及部分电气元器件等。机车车辆和其它机械设备大多属于可修复产品,在使用过程中都是通过修复或者更换新的零件或部件以完全恢复原来的使用性能。

按有关国标的定义,失效是指产品丧失规定的功能。对于可修复产品通常称为故障;对于不可修复产品可用失效。在一般情况下,“故障”与“失效”是同义词,本书多用“故障”一词。

机车车辆故障是指整车整机及其零部件的某项或多项技术经济指标偏离了它的正常状态,在规定的使用条件下,不能完成其规定功能的事件。如某零件及配合的损伤和部件的损坏,致使功能不正常或性能下降;发动机、电机功率降低;机车牵引力下降;传动系失去平稳、振动噪音增大;燃料和润滑油的消耗增加,甚至由于机油泵、水泵、高压油泵、废气涡轮增压器的损坏导致柴油机不能正常工作等。总之,当其偏离了它的正常状态或规定的指标范围时,均属于故障。

2. 故障的判断准则

上述已明确了故障的含义,然而在实际工作中确定哪些算故障、哪些不算故障,却不容易。因为,首先要明确产品对“规定功能”偏离到什么程度才算故障,有些规定的功能是明确的,不会引起不同的认识;有时有些规定的功能难以确定,特别是故障的形式是动态的、发展的,如磨损的限度在使用中是难以确定的。其次,在确定是否是故障,还要分析故障的后果,主要看故障是否影响产品的工作和设备及人身安全。因此,除了以技术指标参数中的任一项不符合规定的允许极限作为故障的判断的准则外,还要考虑若在这种状态下继续工作,是否会发生不允许的故障后果来判别。

一般来说,在确定机车车辆故障判据时,应考虑下列准则:

(1) 在规定条件下,不能完成规定功能;不能在使用条件下或运行中丧失规定的功能。

(2) 在规定条件下,一个或几个性能参数不能保持在规定的上、下限度值内;对于难以确定的功能,故障判断准则“根据可接受的性能来确定”。

(3) 不同产品可按该产品的主要性能指标进行衡量。

3. 故障模式的描述

故障模式是指产品产生故障的表现形式,是通过人的感官或测量仪器得到的故障表现的形式。如发动机怠速不稳、功率不足、水温或油温太高、润滑油压力太低等故障表现形式,这是人们观察到或可以测量出来的。

故障模式是产品故障状态的形式分类,它只反映产品产生何种故障,而不涉及产生故障的原因。为什么要研究故障模式?因为一般研究产品的故障时,往往从产品产生故障的现象入手,进而通过现象寻出故障的原因,同时故障模式也是故障分析方法的基础,如故障树分析法就是从故障模式开始的。

故障模式的描述方法可按产品的各功能级进行。机车、车辆、柴油机产品都是由若干个相互联系的功能有机地组成的功能系统,类似于产品的结构系统。产品的结构系统可用装配系统图来描述。产品的功能也可以用一个功能系统图来表达。产品的整车或整机具有总体功能或者整体系统功能。总体功能是由各级功能子系统构成的复杂系统。各功能子系统之间的关系有上下位功能关系也有并列关系,因而构成了一个完整的功能系统图。故障模式描述,整机性能方面,如动力性下降、油耗过高、噪音过大等。不过故障描述要尽可能从零件、部件的故障模式来描述整车整机的故障。只有在难以用零部件的故障模式或无法确认是某一零件发生故障时,则可用总成、功能子系统或整机故障模式来描述。

二、故障的分类及其等级划分

1. 故障分类

了解、掌握故障的分类,明确各类故障的物理概念,以便分门别类地解决排除故障。故障的分类有多种多样,随着研究目的不同而异。机车、车辆或柴油机的故障可大体按如下分类:

(1) 按照故障的性质划分

可分为自然故障和人为故障。

(2) 按故障责任划分

可分为责任故障与非责任故障。责任故障又可划分为运用、制造和设计造成的责任故障。

(3) 按故障的相关性划分

可分为非相关故障和相关故障。非相关故障是指产品的故障不是由产品或产品中某一功能子系统所引起的故障;相关故障则是由产品或其构件的故障所引起的故障。例如,发动机产生曲轴主轴承“烧瓦”故障,是由机油泵不供油故障造成的,与发动机的配气机构存在的故障无关。对于“烧瓦”故障来说,机油泵不供油故障属于相关故障,配气机构的故障则属于非相关故障。

(4) 按故障部位划分

可分为整体故障和局部故障。

(5) 按故障急缓程度划分

可分为突发性故障和渐进性故障。

突发性故障具有的特点是:偶然性、不可预测性和随机性,不受运转时间的影响,突发性故障发生的概率与其使用时间无关。

渐进性故障的特点是:具有可预防性,事先可以通过诊断和监测仪器进行预报和检修加以排除;渐进性故障发生的概率与运转时间有关,且多发生在机件有效寿命的后期。

一般,判断这两类故障的依据是:故障概率与产品已经使用的时间是否有关。

(6) 按故障时间划分

可分为初期故障期、偶发故障期和耗损故障期。这种分类的特点是按照产品在使用寿命周期内故障发展变化的“浴盆理论”进行划分。

(7) 按故障外部特性划分

可分为可见故障与隐蔽故障。

(8) 按故障的严重程度划分

可划分为完全故障和局部故障。完全故障是指产品性能已超过某种确定的界限,以致完全丧失规定的各项功能的故障;局部故障是产品性能超过某种确定的界限,但没有完全丧失规定功能的故障。

(9) 按故障原因划分

可分为设计性故障、制造性故障以及运用性故障。

(10) 按故障后果的严重性划分

可分为致命故障、严重故障、一般故障与轻微故障四类。

2. 故障等级的划分

对故障进行定性或定量分析时,必须事先划分故障的等级。划分故障等级也就是运用故障后果对系统的影响这一原则进行故障分类。

划分故障等级的一般原则是:

(1) 机件产生故障后,造成人员伤亡情况;

(2) 产生故障后,造成产品本身的损坏情况;

(3) 产生故障后,造成不能完成其主要功能或不能执行任务的情况;机车车辆在铁路线路上产生故障还必须考虑到影响其它机车车辆不能执行任务的情况;

(4) 产生故障后,恢复其功能,排除故障采用措施的费用、劳动量及停机停运时间的长短;

(5) 产品故障后,导致系统的经济损失情况。

综上所述,故障等级的划分要综合考虑性能、费用、停机停运时间周期、安全性等方面的因素,考虑对人身安全、任务完成、经济损失等方面的综合影响。

第二节 故障的统计特征与故障规律

可靠性理论应用于产品设计和制造以后,维修活动也提高到理论上进行研究,由定性向定量发展。无论是可靠性工程还是维修工程,要定量研究产品出现故障的规律,都必须运用故障统计理论。所谓故障统计理论可解释为:利用统计技术和方法对零部件或产品、设备系统的故障模式、寿命特性等进行描述和分析,使之在统计上呈现一定的规律性。

通过故障统计可以掌握产品设备的主要故障和重复故障,给产品设计和可靠性工程部门提供信息,予以改进、加强状态诊断、确切地决定系统的可靠性以及有效利用率和平均寿命;此

外,为解决维修中的问题,如维修配件供应、维修方式等管理工作,都是以故障统计为基础。

一、故障的统计特征参数

产品的故障统计特征是以产品的故障统计特征量为基础进行可靠性分析,并以数量化可靠性指标来表征。这些特征量也是可靠性工程中应用的指标。所以可靠性指标与产品的故障分析具有密切的关系。

机械产品的技术状况总是随着使用时间的延长而逐渐恶化的,其使用寿命总是有限的。其产生故障的可能性也总是随着使用时间的延长而增大,因而它是时间的函数。同时,机械故障的发生具有随机性,因此机械发生故障的情况只能用概率来表示。

1. 累积故障概率与可靠度的关系

假设有同一种类的产品 N 个,在 $t=0$ 时开始使用,该产品工作到一定的时间 t ,有 N_f 个产品出了故障,余下 N_r 个(残存数)产品还继续工作。 N_f 和 N_r 都是时间的函数,因此,可以写为

$$N_f(t) + N_r(t) = N \quad (1-1)$$

则 $N_f(t)$ 与 $N_r(t)$ 之和是一个常数。

由于某个事件的概率可用大量试验中该事件发生的频率来估计。因此,当 N 个产品从开始工作到 t 时刻的故障数为 $N_f(t)$,则当 N 足够大时,产品在该时刻的累积故障概率可近似地用到该时刻出了故障的产品数量与投入使用产品数量之比,即累积故障为

$$F(t) = \frac{N_f(t)}{N} \quad (1-2)$$

例 有110只轴承,工作到500h时,累积失效了10只,工作到1000h时,总共累积失效了53只,求该产品分别在500h和1000h时的累积失效概率大致为多少?

解: $\because t=500, N_f(500)=10,$

$$\therefore F(t) = \frac{10}{110} = 9.9\%.$$

$$\because t=1000, N_f(1000)=53,$$

$$\therefore F(t) = \frac{53}{110} = 48.18\%.$$

从概率的概念出发,如果用随机变量 T 来表示产品从开始工作到发生故障的连续正常工作时间,用 t 表示某一指定时间,则产品在该时刻的可靠度 $R(t)$ 为随机变量 T 大于时间 t 的概率,即

$$R(t) = p(T > t) \quad (1-3)$$

对立事件的概率,即累积故障概率函数 $F(t)$,为随机变量 T 小于或等于 t 的概率,

$$F(t) = p(T \leq t) \quad (1-4)$$

显然,产品在规定时间内故障与不故障是对立的,因此有时也把产品的累积故障概率函数 $F(t)$ 叫做不可靠度。

可靠度 $R(t)$ 与函数 $F(t)$ 的关系,可用如下公式表示

$$R(t) + F(t) = 1 \quad (1-5)$$

$R(t)$ 、 $F(t)$ 随时间的变化关系如图1-1所示。

图中表示在使用开始时($t=0$),所有产品都是好的,故障数 $N_f=0$,则 $R(0)=1, F(0)=0$,随着使用时间的增加,累积故障数不断增加。所有产品,在使用中最后某时刻(不一定是 $t=\infty$)

时)总是要出故障的,因此, $N_f = N, R(\infty) = 0, F(\infty) = 1$ 。

2. 故障分布密度函数与可靠度的关系

通常把累积故障概率函数 $F(t)$ 的导数叫做故障分布密度, 记作 $f(t)$, 用下述公式描述

$$f(t) = \frac{d}{dt} F(t) \quad (1-6)$$

$$f(t) = -\frac{dR(t)}{dt} \quad (1-7)$$

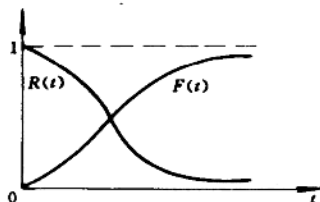


图1-1 $R(t), F(t)$ 随 t 变化的关系

故障分布密度函数 $f(t)$ 和 $F(t), R(t)$ 的关系如下

$$R(t) = 1 - F(t) = \int_0^\infty f(t) dt - \int_0^t f(t) dt = \int_t^\infty f(t) dt \quad (1-8)$$

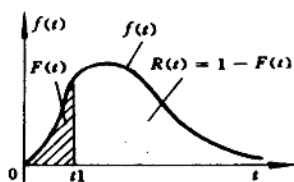


图1-2 $f(t), F(t), R(t)$ 的关系

由上述可以得知, 可靠度 $R(t)$ 与累积故障概率函数 $F(t)$ 成互补关系, 累积故障概率函数 $F(t)$ 与故障分布密度函数 $f(t)$ 成微积分关系。由图1-2可见, t 时刻前的面积代表累积故障概率函数, t 时刻以后的面积代表可靠度。

在工程中确定故障分布密度 $f(t)$ 时, 可以近似地用在 t 时刻给定的一段时间 Δt 内, 同一种类产品单位时间内发生故障的数量 $(\Delta N_f(t + \Delta t) / \Delta t)$ 与投入使用的或试验的总产品数量 N 之比, 即

$$f(t) = \frac{1}{N} \cdot \frac{\Delta N_f(t + \Delta t)}{\Delta t} \quad (1-9)$$

3. 故障率与可靠度的关系

故障率定义: 产品在 t 时间后的单位时间内故障的产品数, 相对于 t 时还在工作的产品数的百分比值, 称作产品在该时刻的瞬时故障率 $\lambda(t)$ 、习惯上称作故障率。

假定 N 个产品的可靠度为 $R(t)$, 那么产品在 t 时刻到 $t + \Delta t$ 时刻的故障数为

$$NR(t) - NR(t + \Delta t)$$

又由于产品在 t 时刻正常工作的产品数为 $NR(t)$, 则瞬时故障率可以写成

$$\lambda(t) = \frac{N[R(t) - R(t + \Delta t)]}{NR(t) \cdot \Delta t} \quad (1-10)$$

当 N 足够大, $\Delta t \rightarrow 0$ 时, 利用极限概念就能化为求导数的形式, 则

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (1-11)$$

在实际工程计算时可按下式

$$\lambda(t + \Delta t) = \frac{1}{N_f(t)} \cdot \frac{\Delta N_f(t + \Delta t)}{\Delta t} \quad (1-12)$$

这样, 故障率可以表示为产品在某段时间内的故障数与此段时间内的总工作时间之比, 即

$$\lambda(t) = \frac{\text{某段时间内的故障数}}{\text{此段时间内的总工作时间}}$$

故障率 $\lambda(t)$ 表示的是某时刻 t 以后的单位时间内产品的故障数与 t 时刻残存产品数之比, 它反映了该时刻后单位时间内产品故障的概率。因此, 有人把故障率称为故障强度。所以产品故障率愈高, 其可靠性愈差。而故障密度 $f(t)$ 反映了某时刻 t 以后单位时间内产品故障数与 $t =$

0 时总产品数之比。因此故障分布密度反映产品在所有可能工作时间范围内的故障分布情况；它们反映了不同的概念。

故障率的单位：1/h 或 %/h、%/1000h (单位时间内产品发生故障的百分数)；开关类间歇工作的产品用 1/动作；机车车辆也可用 1/km 或 1/千公里。

例 设 100 只某种轴承在 1000h 内无失效，在 1000h~1001h 内失效 1 只，1001h~1005h 内失效 13 只。求该轴承在 1001h 和 1005h 的失效率？

解：∵ 1000h 时， $\Delta N_f(t) = 0$ ， $\Delta N_f(1000+1) = 1$ ， $N = 100$ ， $\Delta t = 1$

$$\begin{aligned}\therefore \lambda(1001) &= \frac{1}{N_f(t)} \cdot \frac{\Delta N_f(t + \Delta t)}{\Delta t} \\ &= \frac{1}{100} \cdot \frac{1}{(1001 - 1000)} = 1\%/h\end{aligned}$$

又 ∵ 1001h 时， $\Delta N_f(t) = 1$ ， $\Delta N_f(1001+4) = 13$ ， $N = 100$ ， $\Delta t = 4$ ， $N_f(1001) = 99$

$$\therefore \lambda(1005) = \frac{1}{99} \cdot \frac{13}{4} = 3.28\%/h$$

4. 平均寿命

(1) 平均寿命定义

平均寿命这个术语，对不可修产品和可修产品在概念上是不相同的。对不可修产品是指平均无故障工作时间，对可修产品是指平均故障间隔时间中的平均工作时间。而不是指每个产品报废的时间。

平均无故障工作时间用 MTTF (Mean time to failure) 表示，是不可修复产品故障前工作时间的平均值或数学期望。

平均故障间隔时间用 MTBF (Mean time between failure) 表示，是可修复产品在相邻两次故障之间的时间的平均值或数学期望。

设可修复产品第一次工作时间为 t_1 ，随后出现故障，需要停止工作，修复一段时间后又工作一段时间 t_2 ，又修复一段时间……，这样交替地进行下去。平均故障间隔时间为工作时间的平均值与修复时间的平均值之和。

有时只着眼于产品的工作时间，而不考虑修复工作所需的时间，认为故障是瞬间得到排除的。这时平均故障间隔时间即为相邻两次故障之间工作时间的平均值。平均无故障工作时间和平均故障间隔时间二者都是产品故障前工作时间的平均值。

(2) 平均寿命计算公式

平均无故障工作时间和瞬间修复条件下的平均故障间隔时间，都是工作时间的平均值。所以，不管是可修产品，还是不可修产品，其平均寿命在数学上的表达式是一致的。

① 设 N 个不可修产品在相同条件下进行使用或试验，测得全部寿命数据为 $t_1, t_2, \dots, t_i$ ，则其平均寿命为 MTTF

$$MTTF = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i \quad (1-13)$$

如果 N 值很大，则可将数据分成 m 组，每组中的中值为 t_i ，每组频数即故障数目为 ΔN_{fi} ，则

$$MTTF = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^m t_i \cdot \Delta N_{fi} \quad (1-14)$$

设第 i 组的频率

$$P_i = \frac{\Delta N_{fi}}{N} \quad (1-15)$$

则又可写成

$$MTTF = \sum_{i=1}^{\infty} t_i P_i \quad (1-16)$$

此式为离散型随机变量的数学期望。

② 设一个可修复产品在使用期中,发生了 N 次故障,每次故障修复后又如新的一样继续工作,其工作时间分别为 $t_1, t_2, \dots, t_N$,则其平均寿命为

$$MTBF = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i \quad (1-17)$$

在工程实践中,对于可修复产品,平均寿命是指一个或多个产品在它的使用寿命期中的某段时间内的总工作时间与故障数之比。

二、机车与机件的故障规律

机车、车辆、柴油机及某些机件的故障规律是这些产品、零部件在使用寿命期内故障的发展变化规律。大多数产品的故障率是时间的函数,如图1-3所示,故障率曲线像浴盆的断面,因此,也叫“浴盆曲线”。产品的故障率随时间的变化可划分为三个阶段:早期故障期、偶然故障期和耗损故障期。

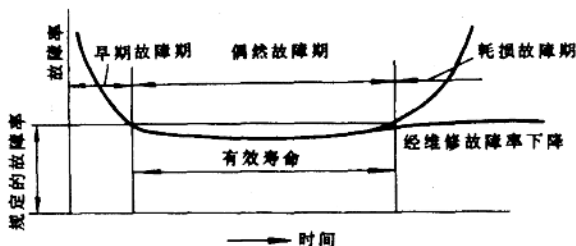


图1-3 产品的故障率曲线

1. 早期故障期

早期故障期出现在产品开始工作的较早时间,它的特点是故障率较高,且故障率随时间增加而迅速下降。故障的原因往往是设计、制造的缺陷或修理工艺不严,质量不佳引起的。例如使用材料不合格,装配不当、质量检验不认真等。对于刚修理过的产品来说,装配不当是发生故障的主要原因。对新出厂的或大修过的产品,可以在出厂前或投入使用初期的较短的一段时间内,进行磨合或调试,以便减少或排除这类故障,使产品进入偶然故障期。因此,一般不认为早期故障是使用中总故障的一个重要部分。

2. 偶然故障期

这是产品最良好的工作阶段,也叫有效寿命期或使用寿命期。它的特点是故障率低而稳定,近似为常数。这一阶段,故障是随机性质的,突发故障是由偶然因素引起的。如材料缺陷、操作错误以及环境因素等造成的。偶然故障不能通过延长磨合期来消除,也不能由定期更换故障件来预防。一般来说,再好的维修工作也不能消除偶然故障。偶然故障什么时候发生是无法预测的。但是,人们希望在有效寿命期内故障率尽可能低,并且持续的时间尽可能长。因此,提高使用管理水平,适时维修,以减少故障率,延长有效寿命期。

3. 耗损故障期

这是产品使用后期。其特点是故障率随时间的增加而明显增加。这是由于产品长期使用，产品磨损、疲劳、腐蚀、老化等造成的。防止耗损故障的唯一办法就是在产品进入耗损期前后及时地进行维修。这样可以把上升的故障率降下来。如果产品故障太多，修理费用太高，即不经济，则只好报废。可见，准确掌握产品何时进入耗损故障期，对维修工作具有重要意义。

以上三个故障期是就一般情况而言的，并不是所有产品都有三个故障阶段，有的产品只有其中一个或两个故障期，甚至有些质量低劣的产品在早期故障后就进入了耗损故障期。例如，发动机的曲柄连杆机构的磨损基本上是按照这三个时期发展的，如图1—4中A；减速器通常只有后两个时期，如图1—4中的B；油路、电路一般只表现出一个时期，如图1—4中的C；紧固件则基本上有前两个时期，如图1—4中的D；而某些质量低劣件，则偶然故障期很短，即进入耗损故障期，如图1—4中的E所示。由此可见：

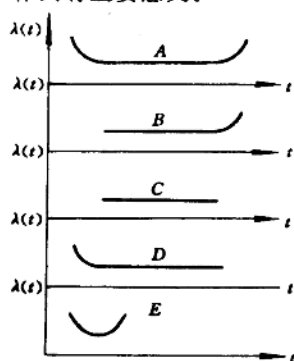


图1—4 某些机件的故障率曲线

1) 由于机件的工作条件和材质不同，其实际故障规律也不同；

2) 即使符合典型故障率浴盆曲线，但其故障率曲线的长短也不一样。这一点需要维修人员认真探索、研究解决。

在偶然故障期内，产品故障率 $\lambda(t)$ 基本上为常数， $\lambda(t) = \lambda, \lambda > 0$ 。

$$\text{因为, } \lambda(t) = -\frac{dR(t)/dt}{R(t)}$$

解此微分方程，利用初始条件， $t=0$ 时， $R(t)=1$ ，得

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (1-18)$$

亦即可靠度为指数分布。于是在偶发故障期内，不可靠度 $F(t)$ 及其概率分布密度函数分别为：

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (1-19)$$

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt} = \lambda e^{-\lambda t} \quad (1-20)$$

三、常见产品寿命分布函数

指数分布是可靠性研究中最常用的一种产品寿命分布形式，其作用类似于正态分布在数理统计领域中的作用。但是，由于机械产品发生故障的原因有磨损、腐蚀、疲劳等不同的特点，故障或产品寿命也有不同的变化规律和分布形式。通常，故障率 $\lambda(t)$ 是随时间的增加而增加的函数。属于这类情况的常见产品寿命分布函数有：正态分布、对数正态分布和威布尔分布等。这里仅介绍威布尔分布。

设产品寿命服从威布尔分布，且

$$\lambda(t) = \begin{cases} \frac{m}{\eta} \left(\frac{t-t_c}{\eta} \right)^{m-1} & m, \eta > 0; t_c \geq 0; t \geq t_c \\ 0 & t < t_c \end{cases} \quad (1-21)$$

则

$$f(t) = \begin{cases} \frac{m}{\eta} \left(\frac{t-t_c}{\eta} \right)^{m-1} \cdot e^{-\left(\frac{t-t_c}{\eta} \right)^m} & t \geq t_c \\ 0 & t < t_c \end{cases} \quad (1-22)$$

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-t_c}{\eta} \right)^m} \quad t \geq t_c \quad (1-23)$$

式中: m 称为形状参数。当 $m > 1$ 时, $f(t)$ 呈单峰曲线; 特别地当 $m \approx 3.5$ 时, $f(t)$ 可近似看作正态分布; 当 $m \leq 1$ 时, $f(t)$ 呈负指数分布; 特别地当 $m = 1$ 时, 威布尔分布可转换为指数分布。

t_c 为位置参数, 表示分布曲线在 t 轴上的起始位置。

η 为尺度参数又叫特征寿命。 η 变化则曲线在纵、横坐标的尺度也变化。如图1—5所示。

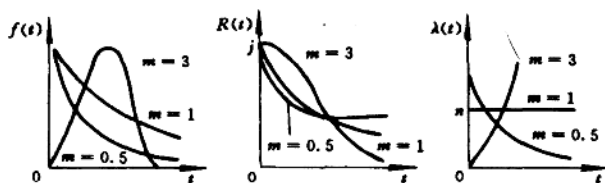


图1—5 威布尔分布曲线

机车车辆具体零部件的寿命服从什么分布函数, 应当通过收集大量实际使用情况或试验数据, 经数理统计推断而求得。严格说来, 其零部件的故障规律, 很少能完全服从某种特定的分布。一般应选择一种比较能说明其失效过程的函数, 或者选择那种在数学模型上便于处理的函数, 以便确定产品的可靠性参数。

四、威布尔分布产品寿命图估法

上面研究产品寿命分布的目的是为了构造产品寿命的数学模型。求解这些寿命分布函数模型, 以确定产品的故障率 $\lambda(t)$ 、可靠度 $R(t)$ 、平均寿命 (MTTF 或 MTBF) 等可靠性参数。从产品设计的角度, 可以为提高产品的可靠性而进行可靠性冗余设计; 从维修的角度, 将为维修周期结构研究设计奠定基础。

产品寿命分布函数的求解方法有: 点估计法和区间估计法、图估法和线性无偏估计法、可靠性评定等等。这里我们仅介绍一种利用威布尔概率纸对威布尔分布进行简便的寿命图估法。而且由于威布尔分布含有近似正态分布和指数分布两个特例, 因此其应用也是很广泛的一种基本方法。

1. 威布尔概率纸的构造

由 (1-23) 式, 得

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-t_c}{\eta} \right)^m} \quad (t \geq t_c) \quad (1-24)$$

当 $t_c = 0$ 时, 设 $t_0 = \left(\frac{1}{\eta} \right)^{1/m}$, 则上式可变成

$$F(t) = 1 - e^{-\frac{t}{t_0}} \quad t \geq 0 \quad (1-25)$$

$F(t)$ 若在等距离普通坐标纸上是一条从原点开始的上升曲线, 见图1—1。若将 (1-25) 式变换成

$$\frac{1}{1-F(t)} = e^{\frac{t}{t_0}} \quad (1-26)$$

且两边连取二次对数, 则得

$$\ln \ln \frac{1}{1-F(t)} = m \ln t - \ln t_0 \quad (1-27)$$

令 $Y = \ln \ln \frac{1}{1-F(t)}$, $X = \ln t$, $B = \ln t_0$, 则有

$$Y = mX - B \quad (1-28)$$

可见(1-25)式与(1-28)式有一一对应的关系。且将 $F(t)$ 刻在左纵坐标上, 对应的 Y 刻在右纵坐标上; 将 t 刻在下横坐标上, 对应的 X 刻在上横坐标上, 这样则可构成威布尔概率纸, 如图 1-6 所示。

(1-28)式在 $X-Y$ 坐标纸上, 是一条直线方程。直线的斜率 m 是威布尔分布的形状参数; 直线的截距 $-B$ 即是威布尔分布的尺度参数 t_0 的函数。

因此, 在普通坐标纸上作威布尔分布曲线便变成在威布尔概率纸上作直线。

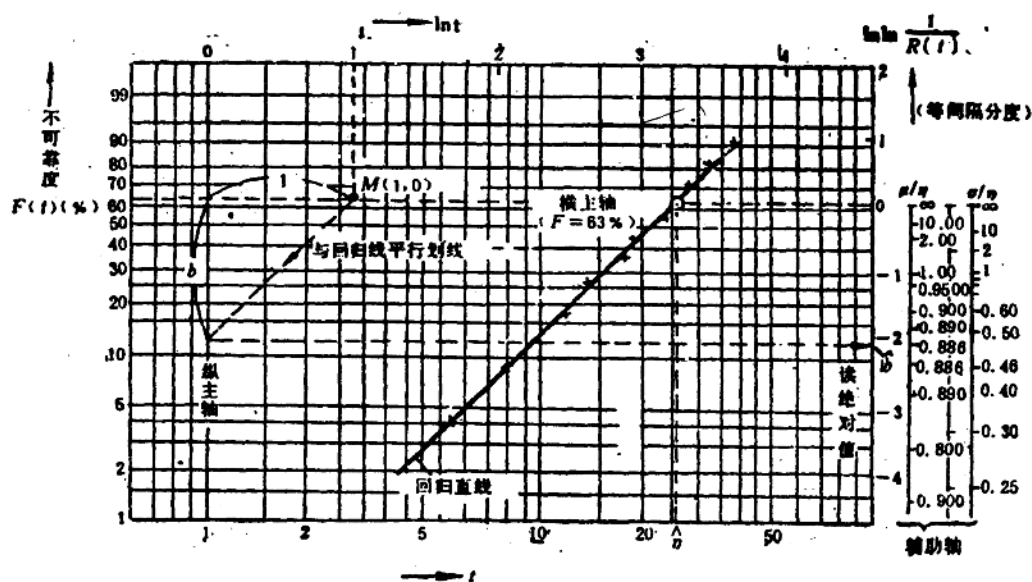


图1-6 威布尔概率纸与图估法

2. 整理数据、描点和配置直线

列表整理数据, 数据表应含测试时间(里程)组、组中值 t_i 、故障数、累计故障数 i 、累计故障概率估计值 $F(t_i)$ (%) 五项。其中, $F(t_i) = i/n$ (n 为使用或试验的同类产品的总数)。当 $n < 50$ 时, $F(t_i) = i/(n+1)$, 或 $F(t_i) = (i-0.3)/(n+0.4)$ 或查中位秩表。

此外, 若组中值 t_i 跨越几个数量级时, 可改变 t 轴的比例尺, 如 1 改为 1×10^2 等。

3. 参数和特征量的估计

拟合直线的斜率就是相应威布尔分布函数中形状参数 m 的估计值, $m = |Y/X|$ 。为在威布尔概率纸上读出该值, 要利用概率纸中一圆点 M , 它的坐标为 $X=1, Y=0$ 。过该 M 点, 作一直线与所拟合的直线平行, 此平行线在 Y 轴上的截距为 $-B$ 。即通过平行线与 Y 轴交点引一水平

线,交于右边Y尺上一点,此刻度尺上读数的绝对值就是 m 值。

分布函数的另一参数是特征寿命 η 。从拟合的直线与X轴交点作垂线,垂足在 t 尺上的刻度就是 η 的图估值。

额定寿命 L_{10} 及中位寿命 L_{50} 是分别以10%和50%失效概率的寿命;亦即此时可靠度分别为90%和50%。这两个寿命指标的图估法与特征寿命相似,即根据拟合直线与 $F=0.1$ 及 $F=0.5$ 水平线的交点所对应的横坐标 t 值,就可以得到 L_{10} 和 L_{50} 的图估值。

平均寿命 μ 的估计要利用概率纸右边的 μ 尺。在作形状参数 m 估计值的水平线延长至 μ 尺处,其交点读数即为 μ 的估计值。

对可靠度 $R(t)$ 和不可靠度 $F(t)$ 的估计,要利用 F 尺。为此在 t 尺上找到刻度等于 t 的点,以此点作一垂线与拟合的直线相交,然后从交点引一水平线与 F 尺相交,读出 F 尺上交点的刻度值,从而得到 $F(t)$ 和 $R(t)=1-F(t)$ 的估计值。

第三节 可修复系统的可靠性

一、可靠性的概念

产品设备的可用性、可靠性和维修性是产品固有的三大特性。产品设备的可靠性具有三个要素:

1. 条件,包括产品的储存、运输、使用安装现场和操作环境等条件;
2. 时间,是指产品使用的期限或时间区间;
3. 功能,即产品规定的功能。

因此,可靠性定义为:系统(产品设备)在规定条件下和规定的期间内完成规定功能的能力。可靠性的数值度量称为可靠度。可靠度是可靠性的基本数量指标之一。

从产品的故障规律“浴盆曲线”中可知,偶然故障期正是产品可靠的使用寿命期,其故障类型属于恒定型。在这个阶段,产品的寿命分布服从指数分布。对于机车车辆产品,当其进入损耗故障期前就应进行维修,恢复其功能。因此,不论是可维修产品还是不可维修产品的可靠性研究,指数分布是常用的一种分布形式,具有与数理统计学中正态分布同等的地位。

对于要求具有高可靠性的机车车辆产品,恒定型偶然故障期是可靠性研究的主要对象。因为,系统产品、零部件的有效寿命或者平均寿命(MTBF)是维修决策的重要依据。其在此期间的故障率 $\lambda(t)=\lambda$ (λ 为大于零的常数),其对应的可靠度函数为指数分布

$$R(t)=e^{-\lambda t}$$

$$\text{MTTF(或 MTBF)} = \frac{1}{\lambda} \quad (1-29)$$

$$\text{累积故障概率函数 } F(t) = \begin{cases} 1-e^{-\lambda t} & (t>0) \\ 0 & (t\leq 0) \end{cases} \quad (1-30)$$

$$\text{故障分布密度函数 } f(t) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda t} & (t\geq 0) \\ 0 & (t<0) \end{cases} \quad (1-31)$$

二、可靠性设计概述

可修复系统(产品设备)的可靠性数量指标与故障的统计特性量及维修性指标是一致的。

可靠性设计是在产品性能设计和结构设计阶段针对系统、产品和零部件,应用可靠性手段,降低产品失效率,提高产品的可靠性,保证产品质量的一种设计。可靠性设计包括:可靠性论证、可靠性结构设计、可靠性试验。在可靠性论证中,主要是确定产品、系统的可靠性指标并进行可靠性预计、分配及可靠性指标的平衡。

机车车辆等机械产品系统是由若干个单元部件子系统构成。根据产品结构图纸可以作出装配系统图。参照装配系统图及其技术参数可进一步作出系统与所有构成单元部件子系统之间,以至各部件与各级分组件、零件之间的可靠性逻辑图。这个逻辑图反映了它们之间的可靠性功能关系。利用这种逻辑关系,建立数学模型对系统的可靠性指标进行预计、分配和平衡。

三、可修复产品的典型可靠性系统

1. 可修复的串联系统

在构成系统的单元中,只要任意一个单元失效则该系统失效,称此系统为串联系统。如图1—7所示。

假定系统是由几个单元构成的可靠性串联系统。系统在使用条件下主要工作在偶然故障期,系统寿命分布服从指数分布,且失效率为常数,即 $\lambda_i(t) =$

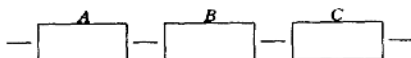


图1—7 可靠性串联系统

λ_i , 单元可靠度设为 $R_i(t)$, 单元寿命设为 $\tau_i, i=1, 2, \dots, n$ 。则

系统失效率:

$$\lambda_s = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (1-32)$$

系统可靠度:

$$R_s = \prod_{i=1}^n R_i(t) = e^{-\lambda_s t} \quad (1-33)$$

系统寿命:

$$\tau_s = \min\{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n\} \quad (1-34)$$

系统平均寿命:

$$MTBF = \frac{1}{\lambda_s} \quad (1-35)$$

2. 可修复的并联系统

构成系统的所有单元,只有全部单元失效时,系统才失效,则称此系统为可靠性并联系统。如图1—8所示。

设由几个单元并联构成的可靠性并联系统。单元寿命为 τ_i , 单元可靠度为 $R_i(t)$, 单元失效率为 $\lambda_i, i=1, 2, \dots, n$ 。在系统中, $n-1$ 个单元是为提高系统可靠度而设置的冗余单元。系统的冗余量为 $n-1$ 。

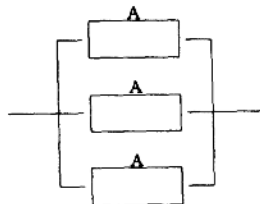


图1—8 可靠性并联系统

系统寿命:

$$\tau_s = \max\{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n\} \quad (1-36)$$

系统可靠度:

$$R_s(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - R_i(t)] \quad (1-37)$$

系统失效率:

$$\lambda_s(t) = - \frac{dR_s(t)/dt}{R_s(t)} \quad (1-38)$$

系统平均寿命:

$$MTBF = \int_0^{\infty} R_s(t) dt \quad (1-39)$$

当 $n=2, \lambda_1=\lambda_2=\lambda$ 时, 则

$$R_s(t) = 2e^{-\lambda t} - e^{-2\lambda t} \quad (1-40)$$

$$\lambda_s(t) = \frac{2\lambda(1 - e^{-\lambda t})}{2 - e^{-\lambda t}} \quad (1-41)$$

$$MTBF = \frac{3}{2\lambda} = 1.5 \frac{1}{\lambda} \quad (1-42)$$

从(1-42)式明显看出, 系统若加入一个冗余并联单元, 则系统的平均寿命是采用单个单元时平均寿命的1.5倍, 大大增加了系统的可靠性。

3. $K/n[G]$ 系统

$K/n[G]$ 系统称为 n 中取 K 表决系统, 如图1-9所示。设系统由 n 个单元构成, 当 n 个单元中至少有 K 个单元正常工作时, 系统则正常工作。也即, 只有当多于 $n-K$ 个单元失效时, 系统才失效。它带有表决的色彩, 故称这种系统为 K/n 表决系统。现以 $2/3[G]$ 系统进行

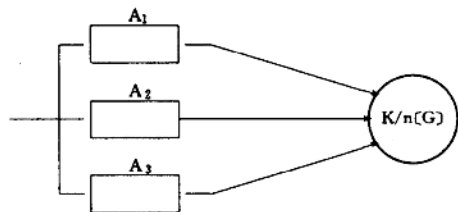


图1-9 $K/n[G]$ 系统

分析。分析此系统, 正常工作的可能性一共有四种: A_1, A_2 正常但 A_3 失效; A_1, A_3 正常但 A_2 失效; A_2, A_3 正常但 A_1 失效; A_1, A_2, A_3 均正常。故系统的可靠度为:

$$R_s(t) = R_1(t)R_2(t)[1 - R_3(t)] + R_1(t)R_3(t)[1 - R_2(t)] + R_2(t)R_3(t)[1 - R_1(t)] + R_1(t)R_2(t)R_3(t) \quad (1-43)$$

若各单元的失效率均为 λ , 各单元可靠度均为 $R_0(t)$, 则

系统可靠度:

$$R_s(t) = \sum_{i=2}^3 \binom{3}{i} R_0^i(t) [1 - R_0(t)]^{3-i} \quad (1-44)$$

若各单元的失效率均为 λ , 即 $R_0(t) = e^{-\lambda t}$, 则系统可靠度:

$$R_s(t) = e^{-3\lambda t} + 3e^{-2\lambda t}(1 - e^{-\lambda t}) \quad (1-45)$$

系统平均寿命:

$$MTBF = \int_0^{\infty} R_s(t) dt = \sum_{i=2}^3 \frac{1}{i\lambda} = \frac{5}{6\lambda} \quad (1-46)$$

除了以上所述的三种典型的可修复的可靠性系统之外, 还有混联系统、贮备系统等。混联系统可以化为串联系统和并联系统进行计算。除了可计算出系统的可靠度、平均寿命之外, 还