

电气故障检测

DIANQI GUSHANG
JIANCE

中国铁道出版社

电 气 故 障 检 测

王祖泽 臧连森 黄相元
陶生桂 徐安 邵德荣 史重光

合 编

中 国 铁 道 出 版 社

1983年·北京

内 容 简 介

本书共分六章，书中除对可靠性技术进行简单介绍外，着重阐述电机、电器、电路的故障检测，以及电机和机械设备的振动检测。对一些检测仪器的特点及使用情况也作了介绍。

本书可作为大专院校有关专业的教学参考书，也可供各工矿企业、厂、段的工程技术人员参考。

王祖泽 臧连森 黄相元

史重光 荣德荣 徐安 邵德荣

合 编

电气故障检测

王祖泽 臧连森 黄相元

陶生桂 徐安 邵德荣 史重光 合 编

中国铁道出版社出版

责任编辑 张贵珍 封面设计 王毓平

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本：787×1092 1/32 印张：11.75 字数：280 千

1983年12月 第1版 1983年12月 第1次印刷

印数：0001—14,000册 定价：1.25 元

前 言

多年来存在这样一种倾向：重设计制造，轻检修运用，认为检修运用中值得研究的问题不多。殊不知无论从运用设备与设计制造中设备的比例来看，或是从事检修运用与设计制造人员的比例来看，都是检修运用占绝大比重，而且在运用实践中的确也有大量问题有待研究。解决这些问题，不仅对保证安全生产有重大作用，对于提高设计制造水平，研究发展新产品，也有重要意义。另一方面，随着电气自动化程度的不断提高与电子计算机的广泛应用，不论在产品制造还是日常检修运用过程中，故障检测技术在国外已有很大发展，国内也在积极开展这方面的工作。由于全国运用设备数量相当大，故障检测技术水平的提高，在提高设备利用率、减少检修费用等方面，将直接或间接地为国家节约大量资金。

我们从1975年开始研究这方面的课题，随后并承接铁道部科技局与机务局下达的科研任务，陆续积累了一些资料，现将有关资料汇编成此书。书中有的实例取自机车，但故障检测技术的原理却适用于各工矿企业的电气设备。

本书共分六章。第一章以较少篇幅作一概述。第二章对可靠性技术介绍一些基本的定义与失效分布，着重介绍应用韦布尔概率纸来计算可靠性问题的实用方法。第三章电机故障检测着重分析讨论了三方面的问题，即：电机主绝缘、匝间耐压与片间检测，除理论分析外还有实际测试与试验数据，有的部分还引用了电子数字计算机的计算结论。其中的牵引电机绝缘检测仪已通过铁道部的部级技术鉴定，并获1982年上海市重大科技成果三等奖，电机电气质量检测仪则通过部级技术审查。由于电气、机械故障之间的联系，在第四章电机和机械设备振动检测内介绍振动频谱分析及便携式测振仪的原理与应用。第五章电器故障检测中着重介绍接触电阻检测与印刷线路板故障检测，接触电阻检测仪已通过铁道部的部级技术鉴定，并获1982年铁道部科技成果四等奖及1982年上海市重大科技成果三等奖。第六章电路故障检测中介绍检测原理与检测设备概况，着重介绍电路故障检测仪的原理与应用。

以上这些内容，对于故障检测技术这门学科来说，只不过如沧海之一粟。我们愿以此书作为引玉之砖，望有更多的同志从事这方面的研究工作并有更多的专著出版问世。

在编写过程中参考了上海铁道学院夏建新、戚文星、黎冠中、施绍祺等所写的《东风₄型内燃机车牵引从动齿轮齿根应力试验报告》、上海铁路局机务职工大学1981年王国康、陈怀康、李一平、钱文豪在教师卢金龙指导下所做的毕业设计、上海铁道学院林圭年所写《电机检测仪中火花检测部分高通滤波器的原理和设计》、薛彭雨所写《机车主电路活接地检测》等文，在此表示感谢。

本书承铁道部机务局严功懋总工程师及王德志工程师审阅，特此致谢。

由于我们工作做得不够，更兼学术水平有限，书中难免存在缺点、错误，敬请读者批评、指正。

编 者

1982年7月

目 录

第一章 概 述	1
第二章 可靠性技术简介	5
第一节 产品的失效规律	5
第二节 几个基本定义	6
第三节 几个常见的失效分布规律	7
第四节 利用韦布尔概率纸推算牵引电机的寿命	10
第三章 电机故障检测	18
第一节 促使电机绝缘自然老化的一些因素	19
第二节 牵引电动机的工作条件	21
第三节 电机绝缘的电气性能	25
第四节 电机绝缘的检测方法	27
第五节 直流高压泄漏电流试验与牵引电机绝缘检测仪	34
第六节 匝间耐压检测	42
第七节 片间检测	54
第八节 直流电机电枢电气参数的综合检测	84
第九节 直流电机炭刷火花检测与高通滤波器设计	86
第四章 电机和机械设备振动检测	94
第一节 概 述	94
第二节 主发电机振动频谱分析	96
第三节 便携式振动检测仪	99
第四节 高转速的测定法	110
第五节 轴承故障检测	113
第六节 计算机故障识别概述	115
第五章 电器故障检测	119
第一节 接触电阻及接触电阻检测仪	119
第二节 印刷线路板故障检测及晶体管电压调整器检测仪	129
第六章 电路故障检测	137
第一节 概 述	137
第二节 电路故障检测的一般方法	138
第三节 国内外使用机车电路故障检测设备的概况	145
第四节 电路故障检测仪	162
第五节 应用微处理器进行电路故障检测的探讨	169
附 录	174

第一章 概 述

一、检测技术

检测技术是一门老的学科，但又是一门随科学技术的发展而不断更新的学科。它是将准备投入运行或正在运行设备的各物理、化学量（能据以说明其性能质量指标的）通过各种手段转变为数量的技术。例如，对于一台旋转机械设备，需要了解它的转速，就要用测速技术。几十年前是用直接接触机械指针式转速表，最低分辨读数不过 $5 \sim 10 \text{ rpm}$ 。后来逐步发展到非接触式的闪频法、感应法、光电法，指示仪表则从指针式发展为数字式，更发展到遥讯、遥测，相应的测量精度也不断提高。

被检测的物理、化学量有：声、光、电、热、力、转速、振动以及液体、气体的化学成分等。针对不同的检测对象，可采用不同的手段，例如：

1. 振动与噪声检测；
2. 光通量检测；
3. 电参数检测；
4. 温度检测；
5. 应力检测；
6. 滑油杂质检测；
7. 微量气体含量检测等。

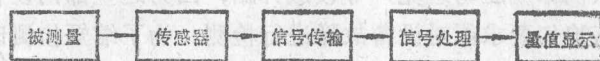


图 1—1 检测过程框图

检测过程可以用图 1—1 的框图表示。

各种被测的物理、化学量通过传感器转变为能向外界输出的信号。例如测振就要用速度传感器或加速度传感器；测光通量要用光敏元件；电参数可以用各种电气仪表直接测试，也可用辅助元件如霍尔元件进行间接测试；测温度可用热电偶之类的测温元件；测应力可贴电阻丝应变片；测特殊管壁压力波需外附专用传感器；分析滑油杂质可进行滑油光谱分析；分析排气中的杂质需进行气体分析等。

由于“电”的特殊优越性能，传感器输出大多为电信号，油、气分析过程中也介入电信号，因而形成了一个特殊领域“非电量的电气测量”，其中要研究各种非电量电测的基本原理，各种传感器的原理、结构与应用范围，测试中的精度与误差等问题。

传感器与测试仪表之间一般都有一定距离，因此输出信号还有一个传输问题，在传输过程中信号既不能失真，又不能受其他干扰的影响。

传输而来的信号要进行“处理”，或是从总的信号中选出有用的信号，或是根据给定程序依次加工各信号，或是对信号进行实时处理，最后再用显示仪表显示。

显示量值有两大领域，或是连续的模拟量——用指针式或记录式仪表显示，或是离散的数字量——用数字式仪表显示或用自动打印机打印。

由此可见，检测技术是一门综合性学科，涉及的领域较多，各领域中新开拓与成就又进一步促进检测技术的发展。

检测技术是一种相当重要的手段,利用各种检测技术目的是为设计、研究部门提供更改设计的科学依据,以便最经济地制造出质量良好的产品,同时还可用来摸索产品质量状态的变化规律,以便定量地对产品质量状态进行判断。因而检测技术对设计、制造、试验、研究、运行、维护等部门都具有重要的意义。

二、故障检测技术

利用各种检测技术来查找故障,称为故障检测技术,或称为故障诊断、状态监控技术。这里所指的故障应包括下列各种情况:

1. 动作偶而失灵但并不影响其功能,或是失灵后能很快恢复正常;
2. 有异状但在短期内并不影响正常工作;
3. 有异状,性能指标没有明显下降,还能在一定时间内勉强维持运行;
4. 有异状,性能指标明显下降,需退出运行进行检修;
5. 已丧失正常功能,必须立即停机;
6. 已发生破坏,随即失去功能并自行停止运转;
7. 已发生严重破坏,并有灾害性事故损失。

以上各项程度不同,但都属于故障。1~5项需进行检修以消除故障,6、7两项则是已错过检修、消除故障的时机而造成事故。

故障检测技术是一门近年来新发展的边缘技术。国外首先是从航天、航空、核电站和军事(例如舰艇与坦克)等领域开始,因为这些部门设备复杂,万一发生事故又有严重后果,因而迫切要求能对设备故障进行检测。为了缩短检测时间,更进一步要求自动检测。

故障检测技术的基础是“检测技术”,首先要针对设备的各种可能故障情况选用适当的检测手段,利用现有的或特殊研制的“检测仪”获得各种“量值”,但它又不只限于此,更重要的还有一个判断标准问题。以振动检测为例,设已有适当的传感器并已取出了相应的振动信号,再假设已从繁杂的信号中分析处理得出表明故障的信号,但这只不过是问题的一个方面,还需判断标准,即:什么类型故障会有什么样的故障信号;什么范围属于正常;什么范围属于可用;什么范围应检修;什么范围应立即停车。这些工作将建立在大量统计资料的基础上并带有较强的政策性,因为所作出的判断牵涉到设备是否需检修,过早停止运行则可能没有充份发挥潜力,过晚则有可能酿成事故。

故障检测技术对传感器又提出了更高的要求,因为这时可能需将传感器作为一项附件,长期地安装在设备内,除了高温、振动等不利的工作环境外,还要考虑两个问题:一是传感器的寿命;二是经济价值。如果传感器的寿命相对较低,或是安装传感器及检测装置的费用大于正常拆检所需的人工费,必然限制了它的应用。

三、电气故障检测技术

电气故障检测是故障检测技术中的一个分支,它包括电机、电器、电子线路、电气线路等内容。近年来,由于电子技术、电工、绝缘材料的飞跃发展,电动机、发电机、变压器、各种交流装置单位功率的体积及重量逐步减小,控制系统则从继电——接触器系统向静止、无触点、小形化的方向发展。电子计算技术、微型计算机也逐渐进入到电气控制系统中。电气

设备与系统越复杂,对设备元件可靠性的要求也越高,因为任何小部件或元件发生的故障都有可能造成生产上的损失,这也进一步为电气故障检测技术的发展提供了物质基础。

对电气故障检测来说,直观故障检查仍是一项必要而通用的措施。

直观检查是根据运行中电气设备的噪音、振动、气味、温度等的变化来判断。

1. 噪音与振动

各种电气设备在运行中都产生一定的噪音与振动,例如变压器铁心就有由于励磁电流而产生的工频噪声,各种旋转电机则有由旋转运动而产生的噪音。

噪音可以单凭耳听来检查,旋转电机轴承内的杂音则需借助金属棒将声音传至人耳,再细心倾听、判断。

旋转电机振动幅度的确切数值应当用仪器来检测、(例如本书第四章、第三节中所介绍的便携式振动检测仪),也可以用简单的百分表来检测。有经验的人员通过长期的实践可以用手触对电机振动的幅度有一个大致的估价。

电机运行时,容许的振幅有一定的限度。

图1—2为电动机容许振动振幅(峰—峰值, μm)的限界。

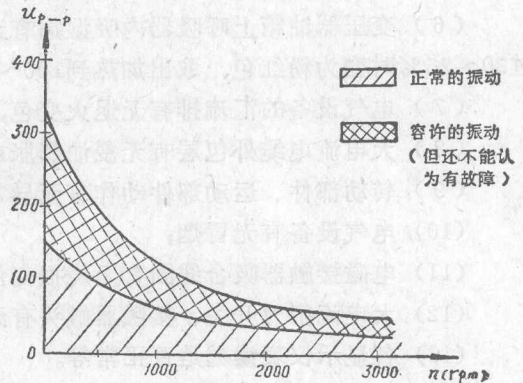


图1—2 电动机振动的容许限界

2. 温度

当电气设备存在如下故障,如电流过大,导电部件连接处接触电阻增大、冷却风道阻塞、油路不畅、润滑不良、旋转部件相互有碰擦、轴承油脂内混有异物等,都会使电气设备的温升升高。

当然,电气设备的温升超过绝缘材料的额定温升限度,并不会立即使电气设备烧损,但将缩短电气设备绝缘的使用寿命。这里有所谓10度原则,即用B级绝缘材料的电气设备的运行温升比额定温升超过 10°C 时,电气设备绝缘的使用寿命要缩短一半。

检查电气设备温度变化的简单方法为:

(1) 手触法:每个人的皮层厚薄有所不同,因此凭手触所能检测的温度也各不相同。一般而言,手指如能在测试面上耐热停留10s,电气设备的表面温度为 60°C 左右。

(2) 用温度计:水银、酒精温度计或电子点温计。

(3) 用示温片:国产彩色示温腊片,直径15mm,厚6~7.5mm,按额定显示温度不同分为 60°C 、 70°C 、 80°C 、 90°C 、 100°C 五种。使用时可将其贴在变压器、电机、刀闸、母线接头等需要监测温度的地方。当监测部位的温度超过示温片额定温度时,示温片即熔化脱落,运行人员即可发现过热现象。

(4) 用测温笔:测温笔与示温片相同,都是用于监测表面温度,测温笔是根据笔中所含的色素在一定温度下变色的特性来指示温度,用于监测电气设备表面温度可用 70°C 、 80°C 、 125°C 等测温笔。如要监测某电气设备表面温度是否已达 70°C ,可用 70°C 测温笔在设备表面划上笔痕,同时计时。如在1、2s内笔痕已变色(笔上标志纸的颜色就是受热后相应变化的颜色),说明表面温度已达 70°C 。如变色时间超过2s,说明温度还不到 70°C ,如划上去立即变色,说明温度已超过 70°C 。

3. 气味:电气设备温升过高时,绝缘材料与各种绝缘漆会发出特殊的气味。凭着这些

特殊的气味，可以发现一些故障。

4. 目检：电气设备运行时，需用目检法判断运行是否正常，例如：

- (1) 直流电机炭刷下火花是否正常；
- (2) 直流电机换向器氧化膜层及升高片颜色是否正常，有无过热变色，换向器表面有无拉伤；
- (3) 直流电机炭刷刷辫有无过热退火；
- (4) 变压器及开关油箱、各油管连接法兰纸柏垫有无漏油；
- (5) 水冷式晶闸管或其他水冷元件的冷却水管路有无漏水；
- (6) 变压器油箱上呼吸器内吸湿剂有无变色（正常时如近于白色的浅蓝色，吸湿量超过20~25%时变为粉红色，取出加热到100~140℃仍恢复到浅蓝色）；
- (7) 电气设备的汇流排有无退火变色，支撑绝缘子有无损伤；
- (8) 大电流电缆外包层有无浸油膨胀或破损；
- (9) 转动部件、运动部件动作有无异常；
- (10) 电气设备有无冒烟；
- (11) 电磁接触器吸合线圈有无烧损变色；
- (12) 大电流闸刀开关、接触器触头有无烧损或接触不良；
- (13) 各显示仪表读数是否正常等。

依靠人的五官功能（有时加上简单的辅助措施）来直观地检查电气设备故障，仍是一项重要的措施，对每一位电气技术人员也是一种基本功，在电气故障检测技术不断发展的时日，仍不可偏废。当然，直观检查有它的局限性，它能够发现一些故障现象，但不能准确判断，也无法做出定量分析。因此，我们就需要研究电气故障检测技术，以便对“故障现象”能有深入的了解。在各个领域中逐步应用各种专用检测仪，既解决目前的实际需要，同时还应积累数据与经验，为今后故障检测中采用电子计算机作好技术准备。

第二章 可靠性技术简介

前一章已指出,现代化的工业企业中,生产中的自动控制非常复杂,任何细微的差错和故障都可能使整个生产过程中断,造成极大损失。

在电传动内燃机车中,电压调整器内部一个小小的电子元件发生故障就可能使整个电压调整器失效,也有可能由此造成运行机车的机破事故。牵引电动机电枢绕组绝缘材料微小的破裂,可能产生对地击穿,使此牵引电动机丧失工作能力。当然,这类故障只不过造成了时间与经济上的损失,而对一些重要设备则将引起机毁人亡的严重事故。

1963年美国海军航空兵飞机每飞行一万小时就有1.46次事故,只在这一年内就有514次重大事故,毁机275架,死亡驾驶员222人,损失2.8亿美元。分析事故原因有43%是由于器材元件不可靠而引起。

提高产品可靠性要付出比较大的代价,但这种代价还是必要的。美国中近程导航系统,在平均无故障工作时间为17h的情况下,每年要付出维护费用15,560美元,可靠性提高8倍以后,维护费用只需1,818美元。

50~60年代,美、苏、加、日、英、法等国都相继成立了研究可靠性问题的全国性专门机构。在我国,可靠性问题也日益受到各方面的重视。

第一节 产品的失效规律

根据大量的使用经验与试验,大多数产品的失效曲线如图2-1所示。曲线的形状似浴盆,所以称为“浴盆曲线”。

从这条曲线可以看出产品失效的三个阶段,即早期失效期、随机失效期与耗损失效期。

1. 早期失效期

早期失效期出现在产品开始工作的较早期间,开始时失效率较高,但随着工作时间增长,失效率逐渐下降。失效的原因往往是由于材料缺陷或设计不良造成的,有的则可能是生产过程中工艺或操作不当。例如,牵引电动机电枢铁心槽清槽不彻底,残留毛刺刺破绝缘;或是电枢线圈下线时不慎,造成线圈内部错股或使匝间绝缘已有隐伤;或是电枢铁心均衡块固定不牢在振动下甩出而轧伤电枢绕组后端鼻部。这些都可能使牵引电动机电枢绝缘对地击穿而失效。

2. 随机失效期

随机失效期是指产品在早期失效期之后、耗损期出现之前的这一时期。这是产品最良好的工作阶段。它的特点是失效率低而稳定,并与时间无关。在这一阶段中,失效是随机性质

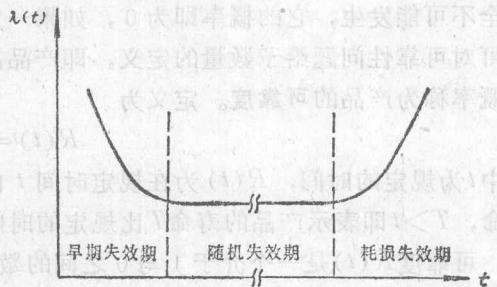


图2-1 产品失效的典型曲线

的。仍以牵引电动机电枢绕组绝缘为例,在这一阶段的较长运行时间内,电枢绕组绝缘在各方面因素的作用下可能在逐渐老化,也可能在振动力的作用下使绝缘出现破损、裂纹(并随着运行时间的增长而逐步向内深入),但都还没有达到老化或贯穿性裂纹的程度,因而绝大部分牵引电动机都能正常运行。在这一阶段中,如电枢绕组绝缘破坏可能是由于一些偶然的因素而造成,例如牵引电动机轴端小齿轮或轴承内圈组装时紧余量小,在牵引电动机运行一段时间以后,小齿轮可能松动而造成电枢“空转”甩无纬带或是轴承烧死而使电枢不转,结果都使电机绝缘遭到彻底破坏。

3. 耗损失效期

产品由于长期使用而性能下降,造成失效迅速增加。这种后期的失效率是随工作时间增加而上升的。失效的原因主要是由于产品材料的化学与物理性能发生变化。以牵引电动机来说,电枢绕组绝缘在振动力作用下可能已出现接近贯穿的裂纹,也可能已老化,因而将发生对地击穿而失效。

为了减少早期失效产品,应对原材料及加工工艺加强严格检验和质量控制,而为了延长随机失效期,则要有稳定而正确的使用维护措施,至于预防耗损失效的方法则是进行预防性检修、修复或更换接近耗损期的元件与部件,推迟耗损失效阶段的到来。

第二节 几个基本定义

产品在规定条件下和规定时间内完成规定功能的能力,称为产品的可靠性。影响产品可靠性有多方面的因素,既有设计、制造、组装、调整等先天因素,也有使用维护方面的问题。在各种因素基本接近的先决条件下,产品的可靠性则是时间的函数,使用时间越长,产品的可靠性也越低。

产品完成规定功能这种事件是一种随机事件,所谓随机事件,即在一定条件下可能发生,也可能不发生的事件。对随机事件出现可能性大小的数值估计量称为概率,某种事情如完全不可能发生,它的概率即为0,如果一定能发生,它的概率为1。采用概率这一概念,即可对可靠性问题给予数量的定义,即产品在规定的条件下和规定的时间内,完成规定功能的概率称为产品的可靠度。定义为

$$R(t) = P(T > t)$$

其中 t 为规定的时间, $R(t)$ 为在规定时间 t 内产品的可靠度,它是时间的函数, T 为产品的寿命, $T > t$ 即表示产品的寿命 T 比规定的时间 t 要大, $P(T > t)$ 为 $T > t$ 的概率。

可靠度 $R(t)$ 是一个介于1与0之间的数,即 $0 \leq R(t) \leq 1$ 。

除随机事件外,客观世界中还有一类现象叫做随机变量,它是一种随偶然因素而变化并按一定概率取量的变量。例如同一家工厂、同一班组,工人按同样图纸、同样工艺制造的电机,质量可能有出入,同批电机用于同一台机车上,寿命长短也不可能相同,这里面的确有许多偶然因素在起作用。虽然如此,还是可以从大量的统计数字中找出它的规律。分布函数就是用来表征随机变量的重要概念之一。

产品的寿命 T 就是一个随机变量,因此可以用分布函数的概念来描述产品失效的统计规律。如果仍以 t 表示规定的时间,以 T 表示产品的寿命,则 $T < t$ 的概率,就称为产品寿命 T 的失效分布函数,即

$$F(t) = P(T \leq t)$$

产品的失效分布函数 $F(t)$ 也称为不可靠度,可靠度与不可靠度的关系为

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

除失效分布函数外,还经常用到概率密度函数的概念。通常把失效分布函数 $F(t)$ 的导数叫做该分布的概率密度函数 $f(t)$,即

$$f(t) = \frac{d}{dt} F(t) = F'(t)$$

失效分布的概念是一个描述产品失效规律的重要概念,此外,还经常用“失效率”这个概念来说明产品发生故障的程度。我们把产品在 t 时间后的单位时间内失效的产品数,相对于 t 时还在工作的产品数的百分比值,称为产品在该时刻的瞬时失效率 $\lambda(t)$,简称为失效率。一般来说,失效率是时间的函数。

所谓产品的寿命,对于不可修复的产品是指从开始工作到产品发生失效之间的工作时间(或工作次数),对于可修复的产品是指两相邻故障之间的工作时间(或工作次数)。在可靠性工作中,常用平均寿命 μ 、寿命标准偏差 σ 、可靠寿命 ρ 、中值寿命 ξ 与特性寿命 η 等表示。

平均寿命 μ 。在寿命特征中,最常用的就是平均寿命,在概率论中称为数学期望或期望。对于象牵引电机、电器这类可修复的产品,平均寿命就是平均无故障工作时间,而不是习惯上认为每个产品达到报废程度的平均时间。在概率统计中,产品的平均寿命用下式表示

$$\mu = \int_{-\infty}^{+\infty} t f(t) dt$$

寿命标准偏差 σ 。平均寿命能反映出一批产品的平均水平,但它不可能充分说明产品寿命的离散程度。为了表达这种特征,采用“寿命标准偏差”这个特征量。对于一组试验数据来说,平均数 μ 是中心所在,而数据的离散情况可以用 t_i 距 μ 的距离总和来表示。对于 N 个观测值的离散程度,可用下式来估计寿命标准偏差

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (t_i - \mu)^2}$$

可靠寿命 ρ 。前面已指出,产品的可靠度 $R(t)$ 是时间的函数。假定开始时产品的可靠度为1,以后在不同时刻,产品的可靠度将具有不同的 r 值($r < 1$)。对于某一给定的 r 值,产品可靠度下降到这一数值的时间,称为产品的可靠寿命。

中值寿命 ξ 。也称为中位寿命。当 $r = 0.5$ 时的可靠寿命,称为产品的中值寿命。产品工作到中值寿命时,失效的概率和不失效的概率各占一半。

特性寿命 η 。当 $r = e^{-1} \approx 0.368$ 时的可靠寿命,称为产品的特性寿命。

中值寿命与特性寿命都属于可靠寿命的范畴,只是给定不同的可靠度数值而已。

第三节 几个常见的失效分布规律

常用的失效分布函数有指数分布、正态分布和韦布尔分布等。

1. 指数分布

指数分布曲线 $R(t) = e^{-\lambda t}$ 如图2-2所示。图中纵坐标为可靠度 $R(t)$,横坐标为失效

率 λ 和时间 t 的乘积。当失效率为常数时,可靠度 $R(t)$ 的数值大小只决定于时间 t 。开始时可靠度为1.0,无限长时间后可靠度为0。指数分布是单参数分布,只要给出失效率 λ ,可靠度函数就全部确定。

指数失效分布的概率密度函数 $f(t)$ 为

$$f(t) = \frac{d}{dt} F(t) = \frac{d}{dt} [1 - R(t)] = \frac{d}{dt} [1 - e^{-\lambda t}] = \lambda e^{-\lambda t}$$

指数失效分布的失效率函数 $\lambda(t)$ 即为 λ ,而它的平均寿命为

$$\begin{aligned} \mu &= \int_{-\infty}^{\infty} t f(t) dt = \int_{-\infty}^{\infty} t \lambda e^{-\lambda t} dt \\ &= \frac{1}{\lambda} \end{aligned}$$

当产品的失效分布函数属于指数分布时,只要有产品的失效率,就可求出其他指标。

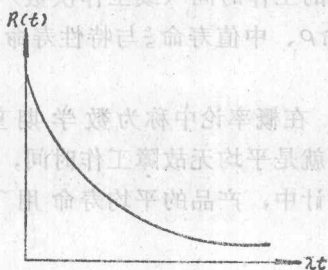


图 2-2 指数分布曲线

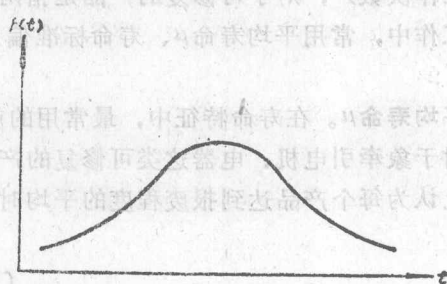


图 2-3 正态分布曲线

2. 正态分布

正态分布(也称为高斯分布)曲线为“钟形”曲线,如图 2-3 所示,其分布密度函数为

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t-\mu}{\sigma} \right)^2}$$

确定这个分布需要两个参数,一是中心数(均值) μ ,二是离散度(标准偏差) σ 。均值 μ 为算术平均值,标准偏差 σ 为分布离散性的量度, σ 越大,分布伸展越宽。对于任何一个给定的分布, μ 和 σ 都是常数,当 μ 和 σ 一经确定后,分布也就确定了。

3. 韦布尔(Weibull)分布

韦布尔分布是可靠性分析中常用的最复杂的一种方法,它需要用三个参数来确定,即尺度参数 α 、形状参数 β 、位置参数 γ 。三个参数的关系由韦布尔密度函数公式表示,即

$$f(t) = \frac{\beta(t-\gamma)^{\beta-1}}{\alpha} e^{-\frac{(t-\gamma)^\beta}{\alpha}}$$

韦布尔分布曲线如图 2-4 所示。当形状参数 β 大于 3 以后就趋向于正态分布;当 β 等于 1 时就变成了指数分布,因此指数分布是韦布尔分布在形状参数 $\beta = 1$ 时的特例。

其分布函数为

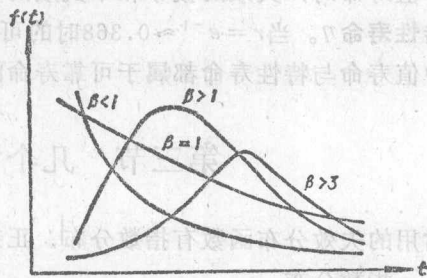


图 2-4 韦布尔分布曲线

$$F(t) = 1 - e^{-\frac{(t-\gamma)^\beta}{\alpha}}$$

韦布尔分布是从这样的角度提出的：设有一条由 n 个环构成的链条，链条的两端受到力 t 的作用，如图 2—5 所示。

如以 T 表示一个链环的强度，此 T 为随机变量，当 $T > t$ 时链环不断裂，当 $T \leq t$ 时就断裂。因此一个链环断裂的概率为

$$F(t) = P(T \leq t) = 1 - P(T > t)$$

一个链环断裂则整个链条就不能使用。当链条由 n 个链环组成时，链条可以使用的概率为

$$[P(T > t)]^n = [1 - F(t)]^n$$

这个观点不仅在链条的强度问题上可以这样考虑，而且凡是某一局部失效就能引起全部功能都停止的场合，如电子元件、牵引电机、甚至大到整台机车都可以同样考虑。这里 T 和 t 分别代表强度与作用力，使表达式与前者形式相同。

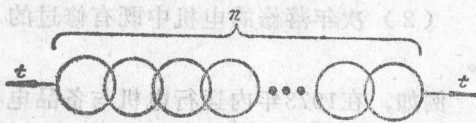


图 2—5 韦布尔分布模型

根据韦布尔分布函数，如在通常的等距坐标纸上作图，则当位置参数 $\gamma = 0$ ，尺度参数 $\alpha = 1$ 时其分布函数为

$$F(t) = 1 - e^{-t^\beta}$$

曲线如图 2—6 所示。

由前式得

$$1 - F(t) = e^{-\frac{(t-\gamma)^\beta}{\alpha}}$$

$$\frac{1}{1 - F(t)} = e^{\frac{(t-\gamma)^\beta}{\alpha}}$$

取自然对数化去指数项得

$$\ln \frac{1}{1 - F(t)} = \frac{(t-\gamma)^\beta}{\alpha}$$

再取一次自然对数，目的是把原式变为对数坐标纸上的线性方程，即

$$\ln \ln \frac{1}{1 - F(t)} = \beta \ln(t-\gamma) - \ln \alpha$$

当位置参数 $\gamma = 0$ 时，则有

$$\ln \ln \frac{1}{1 - F(t)} = \beta \ln t - \ln \alpha$$

如令 $Y = \ln \ln \frac{1}{1 - F(t)}$ ， $X = \ln t$ ， $B = \ln \alpha$ ，则上式可改写成

$$Y = \beta X - B$$

这是一条直线方程，即经过这样的变换，画在这种坐标纸上的韦布尔分布函数曲线图形就是一条直线。这种特殊的坐标纸就称为韦布尔概率纸。

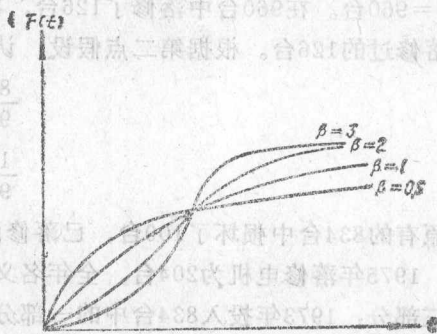


图 2—6 在位置参数 $\gamma = 0$ ，尺度参数 $\alpha = 1$ ，不同形状参数 β 时韦布尔分布的分布函数曲线

第四节 利用韦布尔概率纸推算牵引电机的寿命

本节举两个具体例子来说明如何在韦布尔概率纸上推算牵引电机的寿命。

例 1, 某机务段对牵引电动机因故障而落修统计了一组数据:

年 份	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980
落修台数	142	126	204	121	179	214	139	74

该机务段投入运行的电机与备品电机共有834台。由于统计资料不全,这里做两点假设:

(1) 当年落修的电机都在当年修好后又投入运行或作为备品备用;

(2) 次年落修的电机中既有修过的、又有没有修过的,故障率与各类电机台数成正比。

例如,在1973年内运行电机与备品电机实有834台,1973年内落修电机142台,根据第一点假设,在1973年内名义上所用电机为 $834 + 142 = 976$ 台。

1974年内落修电机为126台,同样根据第一点假设,1974年内名义上所用电机为 $834 + 126 = 960$ 台。在960台中落修了126台,在这126台中,一部分来自原有的834台,另一部分来自落修过的126台。根据第二点假设,认为这两部分依照以下比例分配

$$\frac{834}{960} \times 126 = 109$$

$$\frac{126}{960} \times 126 = 17$$

即原有的834台中损坏了109台,已落修而修复的126台中又坏了17台。

1975年落修电机为204台,全年名义上所用电机为 $834 + 204 = 1038$ 台。损坏的204台中分为三部分:1973年投入834台中的一部分;1974年已修复的126台中的一部分;1975年内已落修而修复的204台中的一部分。根据第二点假设,这三部分依照以下比例分配

$$\frac{(834 - 109)}{1038} \times 204 = 143$$

$$\frac{(126 - 17)}{1038} \times 204 = 21$$

$$\frac{204}{1038} \times 204 = 40$$

1976年落修电机121台,同理,可算出1976年落修电机的比例分配情况,即

$$\frac{(834 - 109 - 143)}{834 + 121} \times 121 = 74$$

$$\frac{(126 - 17 - 21)}{834 + 121} \times 121 = 11$$

$$\frac{(204 - 40)}{834 + 121} \times 121 = 21$$

$$\frac{121}{834 + 121} \times 121 = 15$$

依此类推,将各数据按年份依次排列,可得表2—1。例如,1973年名义所用电机为976台,运行一年损坏142台,两年损坏109台,到第8年(即1980年)损坏23台。以上这些

假设是在统计资料不完全的情况下做出的，目的是介绍推算牵引电机寿命的方法。实际上应当根据详细的检修记录资料进行统计及计算，这样所得的计算结果才有指导意义。

表 2—1

年份	故障台数 投入台数	使用时间(年)								
		0	1	2	3	4	5	6	7	8
1973	976		142	109	143	74	89	85	48	23
1974	126		17	21	11	14	13	7	3	
1975	204		40	21	25	24	13	7		
1976	121		15	19	18	10	5			
1977	179		32	30	17	8				
1978	214		44	24	12					
1979	139		20	10						
1980	74		6							
总计	2033		316	234	216	130	120	99	51	23

将有关数据另行组合，可得表 2—2。表中各数字为正常电机台数，例如 1973 年名义所用电机 976 台中，到第 8 年（1980 年）没有落修过的还有 263 台。

表 2—2

年 份	使用时间(年)	0	1	2	3	4	5	6	7	8
1973		976	834	725	582	508	419	334	286	263
1974		126	109	88	77	63	50	43	40	
1975		204	164	143	118	94	81	74		
1976		121	106	87	69	59	54			
1977		179	147	117	100	92				
1978		214	170	146	134					
1979		139	119	109						
1980		74	68							
剩余数 M	2033	1717	1415	1080	816	604	451	326	263	
投入数 N	2033	2033	1959	1820	1606	1427	1306	1102	976	
$F(t_i) = \frac{N-M}{N}$	0	0.155	0.278	0.407	0.492	0.577	0.655	0.704	0.731	
$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{5.9}\right)^{1.08}}$	0	0.156	0.288	0.399	0.492	0.571	0.638	0.695	0.742	

表 2—1 中一年栏中纵行数字相加为 316，即历年来运行一年落修电机为 316 台，表 2—2 中，8 年来总投入台数为 2033 台，减去落修台数 316 台，即为表 2—2 中第一年的剩余数 1717 台。

表 2—2 中累积故障概率 $F(t_i)$ 为

$$F(t_i) = \frac{N-M}{N}$$

式中 N ——投入的电机总台数；

M ——时刻 t 结束时剩余的电机台数。

根据提供的数据可求出电机故障落修的累积故障概率 $F(t_i)$ ，算得的值列于表2—2中。

然后，依照下列次序在韦布尔概率纸上作图并推算有关参数。

(1) 在韦布尔概率纸上取下边的 t 轴为使用时间，左边的纵轴为累积故障概率 $F(t) \times 100\%$ ，将表2—2中算得的累积故障概率，点在此概率纸上，如图2—7所示。

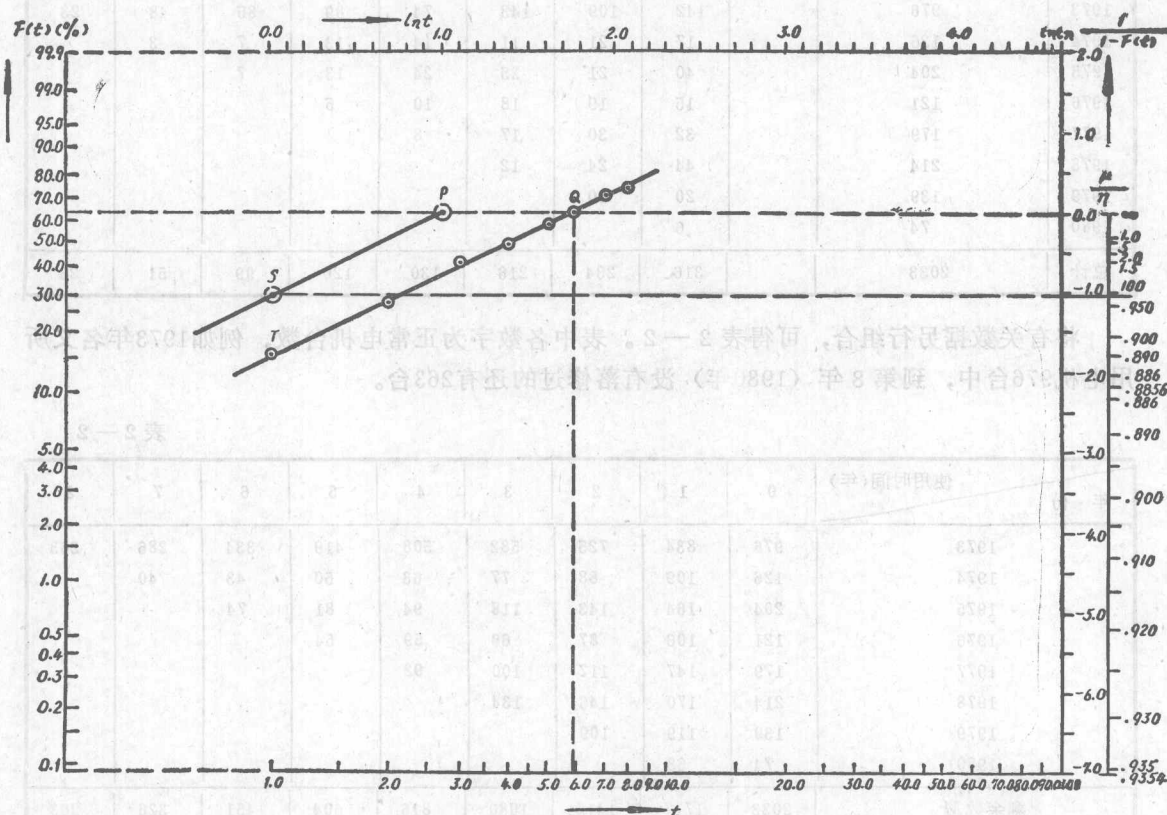


图2—7 在韦布尔概率纸上推算牵引电机的寿命

(2) 根据所得的各点来配置一条直线 QT ，配置该直线时应该注意：

直线上下点数应大致相等，各点单独或成组地交错分布在直线的上下；

直线与各点的偏差之和应尽可能小；

在 $F(t)=0.3 \sim 0.7$ 的范围内要特别注意使其偏差尽可能小，在 $F(t)$ 为0.1以下与0.9以上则可略大些。

若配置成直线，则位置参数 γ 的估计值为0。

(3) 通过上边横坐标轴为1.0与右边纵坐标轴为0.0的坐标点 P ，作直线 $PS \parallel QT$ 。

(4) 过直线 PS 与上边横坐标轴为0.0的直线的交点 S 作平行于下边 t 轴的直线，它交于右边纵坐标轴的值为-1.05，即形状参数 β 的估计值为1.05。同时延长此平行线交右側の $\frac{\mu}{\eta}$ 轴的值为0.985。

(5) 配置的直线 QT 与右边纵坐标轴为0.0的直线的交点为 Q ，它对应的累积故障概率为63.2%。通过 Q 点作垂线与下边 t 轴的交点为5.9，即特性寿命 η 的估计值为5.9年。