

低压电器可靠性技术

河北工学院 陆俭国 主编

机械工业出版社

DIYA DIANQI
KEKAOXINGJISHU



73.2719
599

低压电器可靠性技术

河北工学院 陆俭国 主编



机械工业出版社

8610917

内 容 简 介

可靠性技术是以概率论为理论基础、数理统计为基本方法的一门新技术，它在现代科学技术中占有十分重要的地位。本书在阐述可靠性基础理论的基础上，将可靠性基础理论与低压电器的产品结合起来，讨论了低压电器产品的可靠性问题，并阐述了提高低压电器产品可靠性的某些措施。

本书共分九章。第一章为可靠性概论，对可靠性的基本概念作了简单介绍。第二、三、四章叙述了可靠性的基础理论。第五章至第九章分别叙述了有可靠性指标的电器产品的鉴定方法；电器产品的抽样检查；电器产品的可靠性试验；电器产品的失效分析以及电器产品的质量保证。

本书可供从事低压电器设计、科研、制造及试验工作的工程技术人员使用，也可供低压电器使用部门的工程技术人员使用，还可供高等院校电器专业研究生及电器专业学生作教学用书。

低压电器可靠性技术

河北工学院 陆俭国 主编

责任编辑 刘家琼

封面设计 田淑文

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

中国农业机械出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 787×1092 1/16·印张 15 1/2·字数 381 千字

1984年3月北京第一版·1986年3月北京第一次印刷

印数 0,001-6,345·定价 3.70 元

科技新书目：114-100

统一书号：15033·6245



前 言

可靠性技术是五十年代发展起来的、以概率论为理论基础、以数理统计为基本方法的一门综合技术。它包括可靠性设计、可靠性制造、可靠性试验、可靠性管理以及失效分析等很多内容。产品的可靠性是产品质量的一个重要组成部分。一个设备或系统的可靠性在很大程度上取决于该系统中所用元器件的可靠性,如果元器件的可靠性不高,则系统的可靠性也就很难得到保证。此外,系统的可靠性还随系统中所用元器件数量的增加而有所降低,随着自动控制系统的大型化和复杂化,为保证系统能正常工作,对所用元器件的可靠性提出了越来越高的要求。

可靠性研究始于电子元器件,一些工业发达国家对产品的可靠性问题十分重视,投入了大量的人力、物力进行可靠性研究,取得了很大成效。《阿波罗》登月飞行等大型工程在事先都制订了周密而详尽的可靠性保证计划,这对这些工程的顺利完成起了决定性作用,从这里更可看出可靠性技术的重要。

低压电器品种众多,在国民经济各部门都得到广泛使用。所以提高低压电器产品的可靠性对于实现四个现代化起着重要作用。低压电器的可靠性研究工作起步较晚,但目前已有很多单位在积极开展这方面工作,本书对进一步深入开展低压电器的可靠性研究工作将起一定的促进作用。

本书第一章为可靠性概论,对可靠性的基本概念作了简单的介绍。第二章至第四章叙述了可靠性基础理论及基本知识,第五章至第九章结合低压电器产品分别叙述了有可靠性指标的电器产品的鉴定方法、电器产品的抽样检查、电器产品的可靠性试验、电器产品的失效分析以及电器产品的质量保证。

本书由清华大学蔡宣三教授主审,河北工学院陆俭国副教授主编,书中绪论、第一、二、三、四、五、六、七、九章以及第八章的第五节由陆俭国同志编写,第八章的第一、二、三、四节由重庆市电子公司袁先弟同志编写,电子工业部群力无线电器材厂王庚林总工程师参加了第九章的编写工作。

本书可供从事低压电器科研、设计、制造及试验工作的工程技术人员使用,也可供低压电器使用部门的工程技术人员参考。本书兼顾了1983年5月在杭州召开的高等工业学校电工技术类教材编审委员会电器教材编审小组所制订的《电器可靠性技术》的编写大纲,所以本书也可作为高等院校电器专业学生及电器专业研究生的教学用书。

本书主审人、清华大学蔡宣三教授对本书进行了深入细致的审阅,付出了巨大的精力,谨表示最深切的谢意。

由于编写时间短促,加以编者水平所限,书中不当和错误在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

1984. 8

目 录

绪论	1
第一章 可靠性概论	3
§ 1-1 可靠性基本概念	3
§ 1-2 提高低压电器可靠性的重要意义	5
§ 1-3 可靠性技术工作的基本内容	5
§ 1-4 可靠性分析中的主次图及因果图	6
第二章 可靠性基础知识	9
§ 2-1 失效密度函数及累积失效分布函数	9
§ 2-2 低压电器的可靠性特征参数	12
§ 2-3 失效密度函数 $f(t)$ 、累积失效分布函数 $F(t)$ 以及可靠性特征参数间的相互关系	18
第三章 失效分布类型	23
§ 3-1 常见的失效分布类型	23
§ 3-2 失效分布类型的确定方法	44
第四章 可靠性特征参数的估计方法	68
§ 4-1 可靠性特征参数的点估计	68
§ 4-2 可靠性特征参数的区间估计	78
§ 4-3 可靠性特征参数的图估计	89
第五章 电器可靠性等级的划分及其确定方法	102
§ 5-1 小型电磁继电器可靠性等级的划分及其确定方法	102
§ 5-2 低压电器可靠性等级的划分及其确定方法	105
第六章 电器的抽样检查	108
§ 6-1 抽样检查的基本原理	109
§ 6-2 抽样检查方案的分类	116
§ 6-3 常用的几种抽样检查方案	118
§ 6-4 我国低压电器型式试验抽样检查方案的分析	124
§ 6-5 我国继电器型式试验抽样检查方案的分析	128
§ 6-6 失效率抽样检查	129
§ 6-7 继电器失效率试验抽样检查方案的分析	132
第七章 电器的可靠性试验	134
§ 7-1 概述	134
§ 7-2 鉴定试验	135
§ 7-3 质量一致性试验	137
§ 7-4 可靠性筛选试验	138
§ 7-5 环境试验	142
§ 7-6 可靠性寿命试验	148
§ 7-7 加速寿命试验	151

第八章 低压电器的失效分析	162
§ 8-1 概述	162
§ 8-2 低压电器失效分析的程序	163
§ 8-3 低压电器失效分析的方法和技术	165
§ 8-4 电磁继电器的失效模式及失效机理	176
§ 8-5 电磁接触器的失效模式及失效机理	194
第九章 低压电器的质量保证	204
§ 9-1 质量管理、质量保证与可靠性	204
§ 9-2 低压电器制造与可靠性	206
§ 9-3 质量管理图	212
§ 9-4 低压电器设计与可靠性	220
附表1 标准正态分布累积分布函数数值表	236
附表2 χ^2 分布的下侧分位数 $\chi^2_p(f)$	237
附表3 威布尔分布不同 m 值时的 K_b, g_b, D_b 值	239
附表4 t 分布的下侧分位数 $t_p(f)$	241
参考书目	243

绪 论

在近代科学技术突飞猛进的发展过程中，可靠性技术随着生产和科学技术的发展而产生。同时在不断地解决可靠性问题的过程中也促进了生产和科学技术的飞速发展。产品的可靠性简单地说就是指产品在规定条件的实际使用过程中能否按期及按质发挥其使用效果的问题（严格说来，可靠性特征参数在数学上大多是一个概率）。当可靠性技术尚未明确提出来以前，人们在谈到产品的质量时常用产品的耐久性、寿命、稳定性、安全性以及维修性等术语来表达，而这些名词与可靠性是密切相关的。可靠性单独作为一门技术来加以研究已有几十年的历史。可靠性研究的开端可上溯到1913年美国电气工程师协会(AIEE)发表了AIEE第一号标准“电机和电工仪器定额中温度界限所依据的一般原理”。该标准为元件基本失效机理的分析打下了基础。然而，开始有组织、较大规模地进行可靠性问题的研究工作还是第二次世界大战以后的事情。当时，电子设备大量用于军用装置，但经常发现各种电子设备不能有效地投入使用。在五十年代初期的一次战争中这个问题暴露得就更为明显。美国的雷达设备在84%的时间内不能正常工作而处于待修状态。由于电子设备可靠性不高而使维修费用很高，这就促使美国开始重视可靠性问题，并着手进行调查、研究及试验工作，揭开了电子技术领域内可靠性问题研究的序幕。早期的可靠性研究重点放在电子管方面，在确定高寿命电子管的性能时，不仅重视其电气性能，而且也重视其耐震及耐冲击等性能。五十至六十年代是可靠性飞速发展的十年，美国国防部成立了各种可靠性研究组织。例如，1950年成立了AdHoc可靠性小组、1952年成立了AGREE(电子设备可靠性顾问组)以及1957年成立了ACGMR(AdHoc导弹可靠性委员会)等。在这些组织领导下大规模地开展了可靠性管理、分析及试验等方面的工作。同时，美国各有关技术协会及一些公司、制造厂也大量开展了可靠性研究工作。六十年代后期颁布了有关可靠性管理、组织、设计及鉴定等方面的标准，在电子元器件及电子设备方面的可靠性技术渐趋成熟。七十年代美国在可靠性方面的研究工作逐渐深入到其它领域。综上所述，可见美国是世界上从事可靠性研究工作的历史最早、范围最广、也最有成效的国家。日本也于1958年成立了“防卫厅空幕信赖性研究部门”，同年日本科技联盟成立了可靠性研究会。此外，美、法、西德、苏等国也积极开展可靠性研究工作，至今也已取得很大的成效。

我国在第一个五年计划期间就建立了可靠性和环境适应性的试验研究基地，开展了部分电子产品的可靠性和环境适应性试验。在第二及第三个五年计划期间除对电子产品进行了大量可靠性试验外还开展了电子产品的失效分析工作，在分析研究产品失效机理的基础上对原材料、设计、工艺及生产管理等方面采取了相应措施，从而提高了电子产品的可靠性。近十年来可靠性研究工作已在各类电子产品中普遍开展起来。随着高可靠生产线的逐步建立、全面质量管理的迅速推广以及可靠性研究工作的渐趋完善，电子产品的可靠性水平已有了很大的提高。同时，可靠性研究工作也已逐渐深入到其它领域。

在电器方面，美国在1964年已发布了“有可靠性要求的电磁继电器总规范”MIL-R-

39016, 至今已修订三次(目前代号为MIL-R-39016C)。日本在1980年也发布了有可靠性要求的电磁继电器标准JISC5440。我国电子工业部也已制订出了“有可靠性指标的电磁继电器总技术条件”。对于接触器等低压电器,在法国及西德的有关产品标准中已提到要用统计方法来确定小容量接触器的寿命。我国在低压电器可靠性研究方面起步较晚,但目前已在积极开展这方面工作,1983年在中国电工技术学会领导下成立了电工产品可靠性研究会,组织与推动电机、电器及变压器等电工产品的可靠性研究工作,相信在不远的将来一定会取得成效,从而提高我国低压电器的可靠性水平。

第一章 可靠性概论

§1-1 可靠性基本概念

一、可靠性的定义

产品的可靠性是指产品在规定的条件下和规定的时间（或操作次数）内完成规定功能的能力。

首先，产品的可靠性与规定的功能有密切关系。所谓规定的功能是指产品标准或产品技术条件中所规定的各项技术性能。可靠性定义中的“完成规定功能”是指完成全部的规定功能。

其次，电器产品的可靠性是与规定的条件分不开的。所谓规定的条件是指电器产品使用时的负载条件、环境条件以及贮存条件。显然，负载条件不同时电器产品的可靠性也不同。例如，电器触头接通与断开电流的大小、触头回路电源电压的高低、交流负载电路的功率因数及直流负载电路时间常数的大小都会影响到电器产品的可靠性。环境条件（如温度、湿度、海拔高度、盐雾、冲击、振动等）对电器产品可靠性的影响也很大。显然，在恶劣的环境条件下电器产品的可靠性就低些。贮存条件对电器产品的可靠性也有影响。例如，因贮存条件不良而使电器产品受潮时其可靠性就会降低。

最后也是最重要的是产品的可靠性与规定的时间密切相关。产品在一天内完成规定的功能当然比在一年内完成同样的规定功能要容易得多，所以规定的时间越长，产品的可靠性越低。亦即产品的可靠性随着其使用或工作时间的增长而降低。

对于寿命较长、操作频繁的接触器、继电器一类电器产品，其可靠性与规定的操作次数密切相关。规定的操作次数越多，产品的可靠性越低。

上述可靠性的定义只能定性地描述产品可靠性的高低。为了能定量地描述产品可靠性的高低，下面引入可靠度的概念。电器产品的可靠度是指产品在规定的条件下和规定的时间（或操作次数）内完成规定功能的概率。例如，某规格的接触器操作至 10^6 次时的可靠度为90%，就是指：多次抽取 n 个该规格的接触器，在规定的条件下操作至 10^6 次时，平均有90%的接触器能按规定的条件完成规定的功能。

二、产品可靠性与质量的关系

产品的可靠性是产品质量的一个重要方面。电器产品的质量应包括其技术性能指标和可靠性指标两个方面。这两者之间既有联系又有差别。假如产品可靠性不高，则即使其技术性能指标很先进也不能算产品质量好。例如，一台自动开关的通断能力指标很先进，但动作不可靠，当电路发生短路等故障时，它不能可靠动作而可能造成事故，这台自动开关当然不能算是质量好的产品。反之，产品的技术性能指标假如很落后，则即使其可靠性很高也不能算是质量好的产品。例如，一台自动开关的通断能力很低时，即使它的可靠性很高，电路发生短路故障时它能可靠动作，但它只能用于短路电流较小的场合，亦即其应用条件受到限制，这

台自动开关当然也不能算是质量好的产品。因此，对于一个高质量的产品来说，高可靠性与先进的技术性能指标是缺一不可的。

三、固有可靠性与使用可靠性

IEC300公告中指出：“产品在用户手中显示出的可靠性是对用户最有意义的可靠性”。产品在用户实际使用时显示出的可靠性称为工作可靠性 (Operational Reliability)。它由固有可靠性 (Inherent Reliability) 和使用可靠性 (Use Reliability) 构成。固有可靠性是制造厂在生产过程中所确定的可靠性，它和原材料、零部件的选择、设计、制造、试验直到产品生产出来为止的各个阶段都有密切关系。它是制造厂在模拟实际工作条件的标准环境下进行测定并必须予以保证的可靠性。使用可靠性是与产品使用有关的一些因素所确定的可靠性。产品在制造厂生产出来后，要经包装、运输、贮存及安装等过程才能投入实际使用，产品在实际使用过程中要受到周围环境、操作情况、维修方式及维修技术等因素的影响，在实际使用中人为因素对产品可靠性的影响也很大。上述这些因素确定了使用可靠性。

一个固有可靠性很高的产品如使用不当，其使用可靠性不高，则该产品的工作可靠性也就不理想。相反，一个固有可靠性虽不很高的产品假如使用得当，其使用可靠性很高，则该产品的工作可靠性也还可以。影响电子设备固有可靠性及使用可靠性的因素及其影响程度如表 1-1 所示。

表 1-1 影响可靠性的因素及其影响程度

	影 响 因 素	影响程度
固有可靠性	1. 零部件、原材料	30%
	2. 设计技术	40%
	3. 制造技术	10%
使用可靠性	4. 使用(运输、使用环境、操作、安装、维修技术)	20%

四、失效规律

人们对大量的试验数据和使用中所得到的数据进行统计分析，发现很多产品的失效率 $\lambda(t)$ (它是产品工作到 t 时刻后的单位时间内发生失效的概率) 与时间 t 的关系曲线如图 1-1 所示。

图 1-1 中曲线的形状象浴盆，故通常称为浴盆曲线。从曲线上可看出，产品失效率随时间的变化大致可划分为三个阶段，即早期失效期、偶然失效期与耗损失效期。

(1) 早期失效期 此时期出现在产品工作早期。其特点是产品失效率较高，但随工作时间的增加而降低。此时期内产品失效的原因是由于在设计及制造工艺上存在缺陷。例如，原材料有缺陷、生产工艺欠佳、生产环境卫生不良、生产设备发生故障、操作人员疏忽及质量检验不严格等。

(2) 偶然失效期 此时期内产品的失效是随机性的。其特点是产品失效率低且稳定，接近于常数，此时期是产品的最佳工作时期。

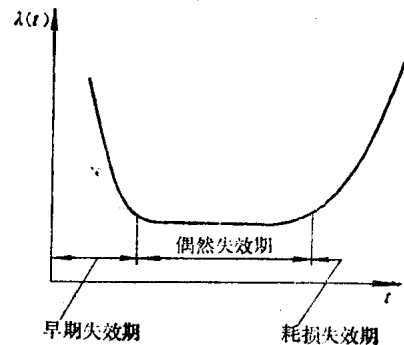


图 1-1 产品典型失效率曲线

(3) 耗损失效期 此时期出现在产品工作后期。其特点是产品失效率随工作时间的增加而明显增高。此时期内产品的失效主要是由于老化、磨损、疲劳等原因造成。

§1-2 提高低压电器可靠性的重要意义

提高低压电器产品可靠性是提高低压电器产品质量的一个重要方面。低压电器品种众多、量大面广。它们广泛用于国民经济的各个部门，起着很重要的作用。但目前低压电器产品的可靠性不很理想，常因低压电器元件工作不正常而使整个设备发生故障，从而造成很大的经济损失。例如，由于一个继电器的触点工作不正常，会使整个轧钢设备发生故障，整个设备停工所造成的损失远远超过继电器本身的价格。特别是随着科学技术和工业生产的不断发展，自动控制系统的规模越来越大，一个大型的自动控制系统常用到几万甚至几十万个元件（例如，一套1700mm直径的轧机中就用了低压电器元件167600件），而整个系统的可靠性与它所用元件的数量有密切关系。假设系统为一个串联系统，即整个系统中只要有一个元件失效，就会使整个系统发生故障，则整个系统的可靠度 R_s 等于它所用各元件的可靠度 R_i ($i=1, 2, \dots, n$)的乘积，即

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

式中 n ——该系统中所用元件的数量。

假定一个系统中所用元件的可靠度均等于0.9999，则当 n 等于不同数值时系统可靠度 R_s 的数值如表1-2所示。

表1-2 系统可靠度与所用元件数量的关系

n	100	1000	10000	100000
R_s	0.99	0.905	0.368	0.00005

由表1-2可以看出，随着系统中所用元件数量的增加，系统可靠度迅速下降。假如要求在 $n=10^5$ 时保证系统可靠度为0.9，则要求每个元件的可靠度应达到0.9999989。由此可见系统越大时，对其所用元件可靠性的要求越高。

综上所述，提高低压电器产品的可靠性是国民经济发展的需要，它具有十分重要的意义。

§1-3 可靠性技术工作的基本内容

所谓可靠性技术就是指与可靠性有关的工程方法。影响产品可靠性的因素很多，从确定产品可靠性指标、研究、试制、设计、制造、试验、鉴定直到投入使用为止的各个阶段都与可靠性密切相关，而且产品在使用失效后对产品进行的失效分析与产品可靠性密切相关。这是因为进行失效分析可以找出产品的失效模式与失效机理，把这种信息反馈给产品的设计、制造人员以及可靠性筛选试验人员，从而找到相应的改进措施来提高产品的可靠性。对于可靠性试验工作量较大或产品生产批量较小的产品来说，对失效产品进行失效分析尤为重要。

图 1-2 为产品可靠性工作基本内容的方框图。图中表示了从产品设计、制造、可靠性筛选、可靠性试验、产品现场使用以及把可靠性筛选、可靠性试验及现场使用中的失效产品进行失效分析，并将所得到的信息反馈到设计、制造及可靠性筛选中去以找到相应改进措施的全过程。

最后还应指出，产品的可靠性还与可靠性组织及可靠性管理有很大关系。要提高产品的可靠性，必须要有良好的可靠性组织以及认真开展全面质量管理。

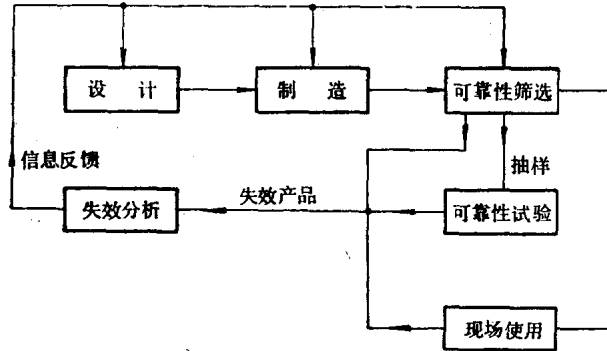


图1-2 可靠性工作基本内容方框图

§1-4 可靠性分析中的主次图及因果图

绘制主次图和因果图是产品可靠性分析中常用的方法。下面分别进行介绍。

一、主次图

为了直观地看出影响产品可靠性的主要因素，一般采用主次图对产品的可靠性进行分析。所谓主次图就是将影响产品可靠性的各种因素用矩形表示之，并按照对可靠性影响的大小顺序排列在横轴上。各矩形的高度表示各个因素对可靠性影响的大小，并用百分数表示（详见例 1-1 中的图 1-3）。

绘制主次图的步骤如下：

(1) 统计产品失效数据，并进行分类。如果要研究产品失效的原因，则按产品发生失效的原因分类。

(2) 统计各种原因造成的失效数（一般称为频数），并计算相对频数（相对频数等于失效数除以失效数据总数）。

(3) 将频数、相对频数按其大小顺序排列（将“其它原因”排在最后），列成表格。

(4) 绘制主次图。

下面以电磁接触器为例说明绘制主次图的方法。

例1-1 假设某型号的电磁接触器在某企业中使用一年共有200台发生故障，其故障原因为辅助触头接触不良、触头熔焊、电磁铁线圈断线等等。试画出该型号电磁接触器故障原因的主次图。

解 (1) 根据统计资料将该型号接触器发生故障的各种原因进行分类，并计算各种故障原因的频数，按其大小顺序排列，如表 1-3 所示。

(2) 计算相对频数，亦列于表 1-3。

表 1-3

序号	故障原因	频数	相对频数(%)
1	辅助触头接触不良	52	26
2	触头熔焊	40	20
3	电磁铁线圈烧坏断线	18	9
4	机械部分磨损、松动、变形	16	8
5	电磁铁噪音严重	12	6
6	接线不良	10	5
7	触点脱落	8	4
8	电磁铁吸合不良	6	3
9	电磁铁释放不良	6	3
10	辅助触头熔焊	4	2
11	其它	28	14

(3) 根据表 1-3 的数据绘制主次图, 如图 1-3 所示。

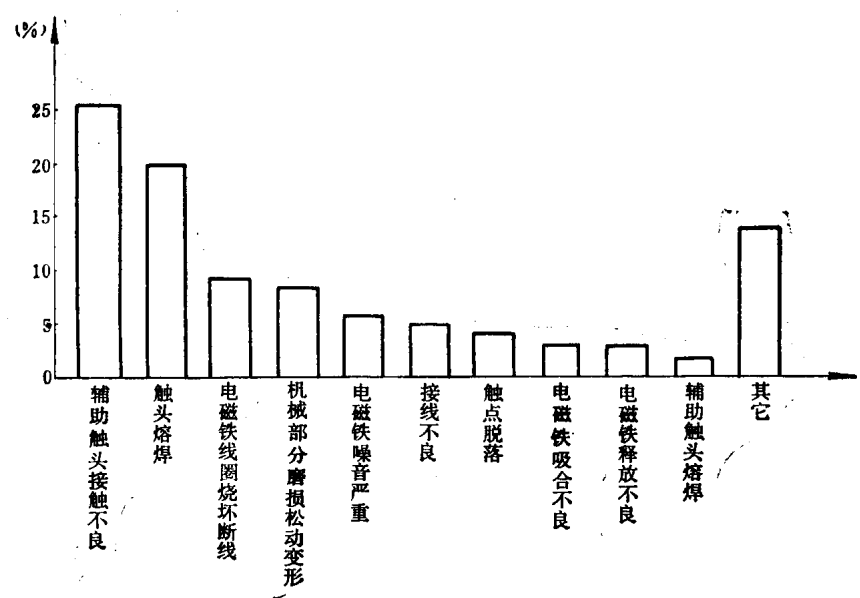


图1-3 电磁接触器故障原因主次图

二、因果图

影响产品可靠性的各种因素是产生故障的原因, 将原因与后果(故障)间的关系画成类似树枝状的图形, 使这些因果关系一目了然的在图上表示出来, 这样的图形称为因果图。作出因果图后, 便于人们按图对影响可靠性的各个因素逐个进行分析, 并采取相应措施以提高产品的可靠性。

下面仍以例 1-1 中的电磁接触器发生故障为例来说明绘制因果图的方法。

例1-2 试画出例 1-1 中电磁接触器发生故障的因果图。

解 电磁接触器发生故障是后果, 在因果图中应画成主干。造成接触器故障的十一种因素是原因, 在因果图中应画成十一个树枝, 并根据其对产品可靠性影响的大小按顺序从右到左排列, 如图 1-4 所示。

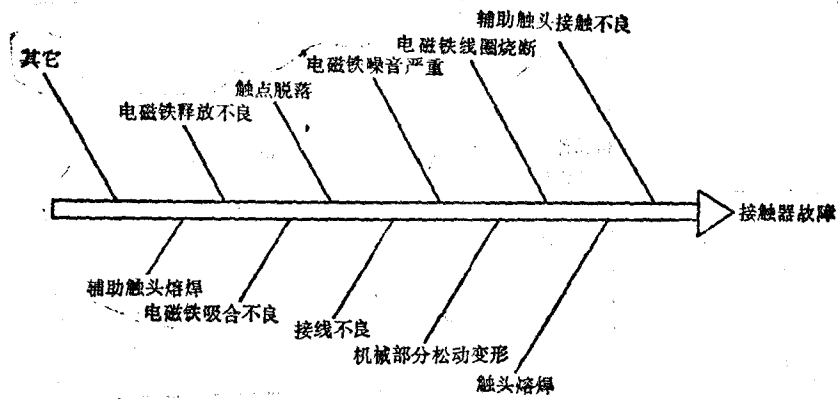


图1-4 电磁接触器故障因果图

图 1-4 是很粗略的,实际上为了将电磁接触器故障的因果关系一目了然的表示出来,因果图还应作得细一些,即应对造成电磁接触器故障的各个因素进一步分别进行分析,找出造成接触器故障的更具体的原因。例如,对电磁铁释放不良这个因素进一步分析后,找出下列几方面原因:线圈断电后磁系统剩磁磁通太大;电磁铁端面有油污;闭合位置反力太小;机械卡死等。而线圈断电后磁系统剩磁磁通太大又可分为闭合位置气隙太小、导磁体材料的剩磁磁感应强度 B_r 及矫顽磁力 H_c 过高等原因造成。这样可在图 1-4 所示的因果图上,在电磁铁释放不良这个树枝上画若干小树枝,并将造成电磁铁释放不良的各个小因素标在小树枝上。对于其它各个因素也进行类似的分析,找出各种小因素,分别在因果图上画上小树枝,并加以标注。这样就形成一个比较细致的因果图,如图 1-5 所示。

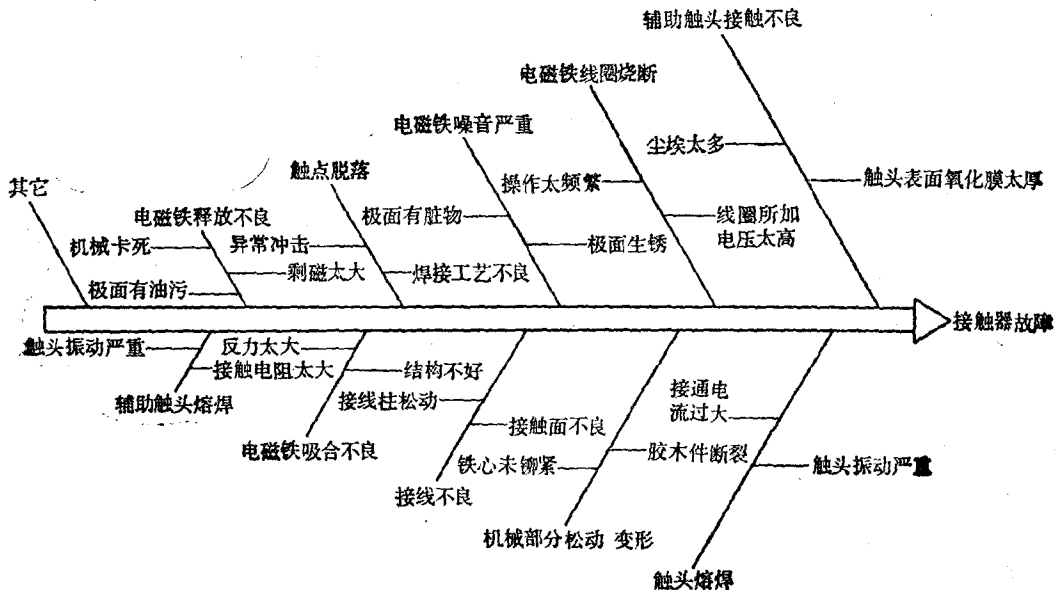


图1-5 电磁接触器故障因果图

第二章 可靠性基础知识

§2-1 失效密度函数及累积失效分布函数

一批产品在进行寿命试验时,各个产品的失效时间(对频繁操作的低压电器元件来说,指试验到元件失效为止的操作次数)可能相差很多,但是失效数据是遵循一定规律的,用数理统计的语言来说,产品的失效时间是服从一定分布的。只要我们对失效数据进行适当的处理和加工,就能找到反映事物本质的规律性。失效频率直方图和累积失效频率直方图就是一种失效数据的加工处理方法。从失效频率直方图中可以直观地看出失效数据的大致分布情况,并进而引出失效密度函数及累积分布函数。这两个函数在可靠性技术中的地位十分重要,由它们可求出可靠度函数、失效率函数以及表示寿命的一些可靠性特征参数。下面分别叙述失效频率直方图、失效密度函数、累积失效频率直方图及累积失效分布函数。

一、失效频率直方图

如果在一批产品中抽取 n 个产品进行寿命试验,设所测得的各试品的失效时间(即寿命)为 t_1, t_2, \dots, t_n ,则可按以下方法处理:

(1) 分组 按一定时间间隔 Δt (Δt 称为组距)把失效时间分成若干范围,从而把 n 个失效数据分成若干组。若分组数过少,则不足以说明数据的性质。若分组数过多,则又过于繁琐。适当的分组数 k 可由以下经验公式确定:

$$k = 1 + 3.3 \lg n \quad (2-1)$$

(2) 列表表示各组失效时间的范围以及各组的 $t_i, \Delta m_i, f_i^*, F_i, f_i$ 的数值。

其中 t_i 为第 i 组的失效时间范围的中值。

Δm_i 为第 i 组的频数,即第 i 组中的失效数据的个数;

f_i^* 为第 i 组的失效频率,即第 i 组的频数 Δm_i 与失效数据总数 n 之比值

$$f_i^* = \frac{\Delta m_i}{n} \quad (2-2)$$

F_i 为第 i 组的累积失效频率,即从第一组到第 i 组的失效频率的和

$$F_i = \sum_{j=1}^i f_j^* = \sum_{j=1}^i \frac{\Delta m_j}{n} \quad (2-3)$$

f_i 为第 i 组的失效频率 f_i^* 与组距 Δt 的比值,即

$$f_i = \frac{f_i^*}{\Delta t}$$

(3) 作失效频率直方图 以失效时间 t 为横座标,以 f_i 为纵座标,以矩形的形式作成的直方图称为失效频率直方图,如图2-1所示。

失效频率直方图中各矩形面积表示失效数据落在相应失效时间范围内的频率。显然,图中所有矩形面积的和等于1。

二、失效密度函数

如果在数据处理时, 将组距 Δt 取得小些(即分组数多些), 则可作出新的失效频率直方图, 其分布情况与图 2-1 是一致的, 但相邻矩形的高度差缩小了。可以设想, 当试验数据越来越多, 并不断缩小组距即 Δt 越来越小时, 失效频率直方图中各矩形顶部的轮廓线将趋近于一条光滑的曲线, 它就是失效密度曲线, 如图 2-2 所示。其数学表达式 $f(t)$ [⊖]就称为失效密度函数。

由于图 2-1 中的各矩形面积之和等于 1, 所以图 2-2 中失效密度曲线与横座标轴间的面积也等于 1。这是失效密度函数 $f(t)$ 的一个重要性质, 即

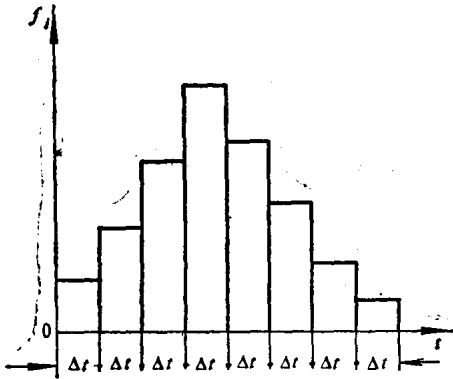


图 2-1 失效频率直方图

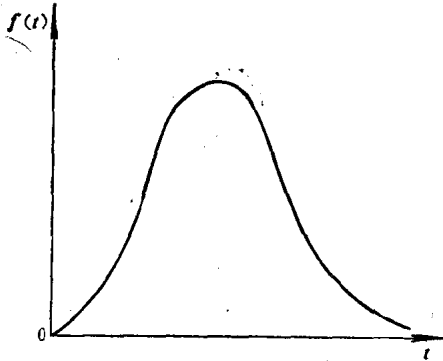


图 2-2 失效密度曲线

$$\int_0^{\infty} f(t) dt = 1 \quad (2-4)$$

失效时间这个随机变量 ξ 在任一点 t 附近的小区间 $[t, t + \Delta t]$ 内取值的概率 $P(t \leq \xi \leq t + \Delta t)$ 等于 $\frac{\Delta m}{n}$ (Δm 为落在区间 $[t, t + \Delta t]$ 内的失效数据数), 即

$$P(t \leq \xi \leq t + \Delta t) = \frac{\Delta m}{n}$$

由此可得

$$\frac{P(t \leq \xi \leq t + \Delta t)}{\Delta t} = \frac{\Delta m}{n \Delta t}$$

当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, 可得

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t \leq \xi \leq t + \Delta t)}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{n \Delta t} = f(t) \quad (2-5)$$

可见, $f(t)$ 表示失效时间这个随机变量 ξ 在 t 附近取值的概率大小, 所以把 $f(t)$ 称为失效密度函数。

显然, 失效时间 ξ 在区间 $[a, b]$ 内取值的概率 $P(a \leq \xi \leq b)$ 等于 $\int_a^b f(t) dt$, 即

$$P(a \leq \xi \leq b) = \int_a^b f(t) dt \quad (2-6)$$

⊖ 严格说, 密度函数表达式应为 $f(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{n \Delta t}$

三、累积失效频率直方图及累积失效分布函数

如以失效时间 t 为横座标，以累积失效频率 F_i 为纵座标作直方图，即可得到累积失效频率直方图，如图2-3所示。

如试验数据很多，组距 Δt 取得越来越小（即分组数越来越多），则图2-3累积失效频率直方图中各矩形右上角顶点之连线将趋近于一条光滑的曲线，此曲线称之为累积失效分布曲线，如图2-4所示。其数学表达式 $F(t)$ 称为累积失效分布函数。

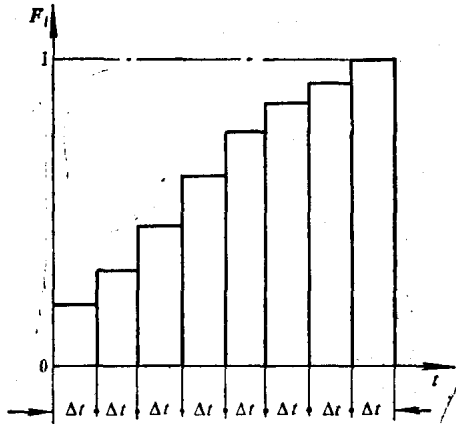


图2-3 累积失效频率直方图

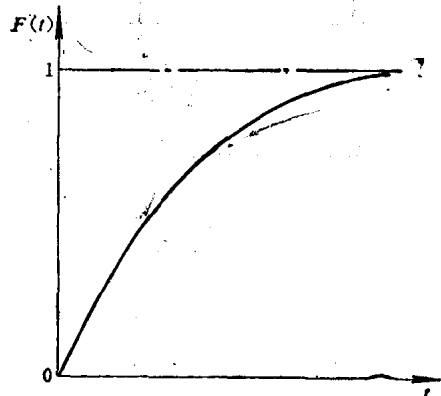


图2-4 累积失效分布曲线

例2-1 如对40个某型号的继电器进行寿命试验，其寿命数据如表2-1所示。试画出其失效频率直方图及累积失效频率直方图。

表2-1 40个某型号继电器的寿命数据（单位为 10^5 次）

0.2, 0.3, 0.5, 0.7, 0.8, 1.1, 1.15, 1.2, 1.25, 1.35, 1.4, 1.5, 1.7, 1.8, 1.9, 2.05, 2.1, 2.15, 2.2, 2.3, 2.35, 2.4, 2.45, 2.5, 2.6, 2.65, 2.7, 2.8, 2.9, 2.95, 3.2, 3.5, 3.6, 3.8, 3.9, 4.3, 4.7, 4.9, 5.2, 5.6

解 将 $n=40$ 代入式 (2-1) 得 $k=1+3.3\lg 40=6.29$ ，取 $k=6$ 。根据 $k=6$ 及表2-1的寿命数据取 $\Delta t=10^5$ 次。然后统计各组的频数 Δm_i ，并计算各组的频率 f_i^* 、累积失效频率 F_i 以及频率 f_i^* 除以组距 Δt 所得之商 f_i ，将所得数据列表，如表2-2所示。再根据表2-2中 f_i 及 F_i 的数据即可画出该型号继电器的失效频率直方图（如图2-5所示）及累积失效频率直方图（如图2-6所示）。

表2-2 某型号继电器寿命数据的整理

组号	寿命数据范围, 单位为 10^5 次	$\frac{t_{st}}{10^5}$ 次	Δm_i	f_i^*	F_i	$\frac{f_i}{1/次}$
1	0~1	0.5	5	0.125	0.125	0.125×10^{-5}
2	1~2	1.5	10	0.25	0.375	0.25×10^{-5}
3	2~3	2.5	15	0.375	0.75	0.375×10^{-5}
4	3~4	3.5	5	0.125	0.875	0.125×10^{-5}
5	4~5	4.5	3	0.075	0.95	0.075×10^{-5}
6	5~6	5.5	2	0.05	1	0.05×10^{-5}