

第 1 章 电子产品结构工艺基础

1.1 概述

1.1.1 电子产品的特点

随着时代的进步和电子科学技术的发展，电子产品不仅渗透到国民经济的各个领域和社会生活的各个方面，而且已经成为现代信息社会的重要标志。以视听电子产品为例，电子技术领域出现的数字技术、卫星技术、光纤及激光技术、信息处理技术等新技术都迅速地应用到电子工业生产中，使新一代的视听电子产品面貌为之一新。特别是近若干年来，电视、音响产品已不再局限于作为文化娱乐的工具，而成为家庭和个人自社会取得各种信息的终端设备，这些设备技术精良、功能齐全、造型优美、使用方便。

现代电子产品种类繁多且又各具特点，这里不可能详加叙述，仅就其整体而言，择较为突出的几点归纳如下。

(1) 电子产品具有“轻、薄、短、小”的特点，使它在知识、技术、信息的密集程度上高于其他产品。知识和技术的密集，导致物化劳动的密集，因而产品附加价值也高。正因为如此，电子设备的应用可以大大提高生产效率和工作效率，降低能源消耗，获得较大的经济效益。

(2) 电子产品使用广泛。目前已广泛应用于国防、科技、国民经济各个部门以及人民生活等各个领域，并且用于高空、地下、沙漠、海洋。因此，工作环境十分复杂，往往要在恶劣气候等条件下工作。

(3) 电子产品的可靠性要求高，对军用及航天设备，可靠性要求更高，否则会带来不可弥补的损失。例如航天电子设备，在十分复杂的组成中，若某一个元器件或连接点发生故障，就会影响正常工作，甚至会导致导弹、运载火箭和卫星的飞行失控。

(4) 电子产品的精度要求高，控制系统复杂。当代科学技术的许多进步和人类征服自然的辉煌成绩，往往都是由电子设备的高精度和高度自动化带来的成果。例如卫星通信地面站要求直径 30 米的抛物面天线自动跟踪数万千米高空的人造卫星不发生偏差，还要求在一年之内电源不中断，遇到故障能自动换接备用电源等。

1.1.2 电子产品工艺与生产

任何电子产品，从原材料进厂到成品出厂，往往要经过千百道工序的生产过程，而在这一生产过程中，有 80% 以上工作是由具有一定技能的工人，操作一定的工装设备，按照特定的工艺规程方法去完成的。这些生产活动都是工艺要素的有机结合，任何企业在生产中都少不了工艺工作这一环节。企业的生产活动是和企业的经济利益密切结合在一起的。市场上产品的竞争，实质上是企业生产能力的竞争。如果我们将同类电子产品的各生产厂家的生产特点和产品特色做一对比，不难发现，一个工厂的状况正是该厂生产管理状况的概括。人们

常说：生产方式无不是该国、该地区、该企业的传统工艺特点的总和。

什么是工艺工作呢？工艺工作是企业生产技术的中心环节，是组织生产和指导生产的一种重要手段。在产品的设计研制阶段，它的工作内容是确定产品的制造方案并完善生产前的技术准备工作。在产品的制造阶段，它的工作内容是组织和指导符合设计要求的加工生产，直到包装出厂为止而采取的一切必要的技术和管理措施。因此，工艺工作就像一条纽带把企业各个部门，把生产各个环节联系起来，成为一个完整的制造体系。

工艺工作的内容又可分为工艺技术和工艺管理两大方面。工艺技术是生产实践中劳动技能及应用和应用科学研究成果的积累和总结。提高工艺技术水平是工艺工作的中心。但是，任何先进的技术又都是通过管理工作的保证才得以实现和发展的。工艺管理是对工艺工作的计划、组织、协调与实施，是保证工艺技术在生产实际中贯彻和不断发展的管理科学。

由于工艺工作是解决企业的产品怎样制造，采用什么方法，利用什么生产资料去制造的综合性活动，所以工艺工作的水平高低，直接决定了在一定设计条件下，能制造出多少种，能制造出什么水平的产品。这说明工艺就是生产力的基本要素，是生产力中的因素。马克思指出：“各种经济时代的区别不在于生产什么，而在于怎样生产，用什么手段进行生产。”这是马克思对生产力和生产关系的精辟概括，也充分说明工艺对人类的生产活动，对人类社会发展的重要作用。在当今新技术革命的年代，它更显得重要。

生产实践证明，无论产品多么复杂，劳动技能要求多么高，任何装配操作都可以分解成一些简单操作动作的组合。因此，采用先进的技术（工装、工具、设备等），拟定良好的工作方法（取消不必要的工艺，合并工序工步，调整工序的顺序，简化所需的工序等），改善工作环境（工作台凳、光线适宜、场地布置合理等），以使每一工作的操作简单、流畅、高效率、低强度，这就是工艺工作的着眼点。

1.1.3 电子产品结构工艺发展简况

电子产品箱柜结构形式也是随着电子技术的发展而发展的。电子技术始于通信技术，即电报和电话的发明和使用，后来由于电磁波理论的提出与实用，出现了无线电通信，从此，借助电磁信号来传输信息的方法便得到了应用，并且应用范围不断扩大，设备构成形式也就产生了变化。

早期的电子产品结构与有线通信产品相似，采用木箱结构，电气元件固定在一块绝缘板上，并水平地放在一个木箱上，主要电气元件都在绝缘板的外边，箱内主要用裸导线连接，安装方式为螺钉连接。

在 20 世纪 20 年代，由于真空二、三极管的出现，大大推动了电子技术的发展，以电子管为中心的电子技术得到广泛应用，无线电收音机成为商品。这时的电子产品为一块水平底板放在箱中，箱前安装一块装有调节旋钮的胶木板。由于电子管制造技术的进步，通信产品的应用日益扩大（如安装于汽车和舰船上），产品的强度和电磁屏蔽的问题变得十分突出，因而不得不在结构设计中加以考虑。

在 20 世纪 30 年代，电子设备的外壳采用了金属材料，产品结构的布局由一个水平放置的金属底板及一个垂直放置的面板构成机芯，各种元器件布置在金属底板的上面，把阻容元件及其之间的连线布置在底板的下面，在面板上放置控制器、显示器及输入、输出的接线端子，外面配上机箱。当时大型设备的结构形式是用角铁焊接而成的机架，把由底板和面板组成的机芯一层层地装入机架内形成一个整体。由于当时所用的电子元器件是电子管、大型电

阻、电容，手动调谐机构，因此体积和重量都很大。

在 20 世纪 40 年代，较为复杂的电子产品如电视机、雷达的问世，以及短波通信的发展，产品体积庞大，笨重，已不适应实际需要，因而出现了将复杂的设备分为若干简单部件及树立起结构级别的先进想法。为了防护坦克和飞机上的电子产品使之不受气候的影响，而研制出密封外壳，为了防止机械过载而研制出减震器，使设备结构功能进一步完善。

进入 20 世纪 50 年代，由于晶体管的出现及应用，使电子技术发生了一场革命，电子产品进一步的复杂化，对结构提出了新的要求，即要有最小的体积和重量。采用提高集成度的新方法，导致了单、双层印制电路板的大量使用，同轴电缆和微带传输线的应用。集成电路、微型组件的产生又进一步提高了组装密度，因而设备中小规模和中规模单元块结构出现了。

从 20 世纪 60 年代开始，电子元器件出现了飞速发展，大约每 10 年就有一次飞跃。在 20 世纪 80 年代，大规模集成电路及超大规模集成电路已经出现，在电子设备中为提高可靠性，降低能耗和成本，大量采用集成电路及高密度印制电路板（多层印制板），这就是现在称之为的微电子设备，使电子设备向固体化、小型化、高可靠性和多功能等方向发展，产品结构也随之向更高层次过渡。

1.1.4 本课程的任务

设计和制造出优良的电子产品，除了应满足其工作性能的要求之外，还必须满足加工制造的要求。电路性能指标的实现，最终都要通过具体的结构体现出来，这就是本课程所要讨论的主要内容。全书共八章，介绍了电子产品结构工艺基础、电子产品的防护、电子设备的制造工艺、电子设备的机械结构工艺等。

本课程对于从事电子产品设计与制造的人员是很重要的。在实际工作中，电路设计与结构设计关系十分密切，在有些情况下很难分清楚，尤其是微电子设备的制造，有时电路与结构就是一个完美的统一体。因此，电路设计人员掌握和了解结构工艺的知识，不仅对电路设计有益，而且密切与结构设计人员的配合，解决在设计过程中可能出现的电路与结构的矛盾，也是很有益的。

本课程所涉及的知识面较广，在学习本课程之前，应具备理化基本知识，机械基础、元件材料、电子线路及有关专业方面的知识。在学习过程中，要多接触生产实际，多了解各类产品构造及使用特点，把实际知识与书本知识结合起来，才能学好这门课。

1.2 对电子产品的基本要求

制造电子产品的出发点是基于用户的需要。显然，电子产品除了在满足技术性能要求下能正常而可靠地工作外，在设计和制造电子产品时还应满足其他基本要求。

1.2.1 工作环境对电子设备的要求

电子产品所处的工作环境多种多样，气候条件、机械作用力和电磁干扰是影响电子设备的主要因素。必须采取适当的防护措施，将各种不良影响降低到最低限度，以保证电子设备稳定可靠地工作。

1. 气候条件对电子产品的要求

气候条件主要包括温度、湿度、气压、盐雾、大气污染、灰尘砂粒及日照等因素。它们对设备的影响主要表现在使电气性能下降、温升过高、运动部位不灵活、结构损坏，甚至不能正常工作。为了减少和防止这些不良影响，对电子产品提出以下要求：

(1) 采取散热措施，限制设备工作时的温升，保证在最高工作温度条件下，设备内的元器件所承受的温度不超过其最高极限温度，并要求电子设备耐受高低温循环时的冷热冲击。

(2) 采取各种防护措施，防止潮湿、盐雾、大气污染等气候因素对电子设备内元器件及零部件的侵蚀和危害，延长其工作期。

2. 机械条件对电子产品的要求

机械条件是指电子产品在不同的运载工具中使用，所受到的振动、冲击、离心加速度等机械作用。它对产品的影响主要是：元器件损坏失效或电参数改变；结构件断裂或变形过大；金属件的疲劳等。为了防止机械作用对产品产生的不良影响，对产品提出以下要求：

(1) 采取减振缓冲措施，确保产品内的电子元器件和机械零部件在受到外界强烈振动和冲击的条件下不致变形和损坏。

(2) 提高电子产品的耐冲击、耐振动能力，保证电子产品的可靠性。

3. 电磁干扰对电子产品的要求

电子产品工作的周围空间充满了由于各种原因所产生的电磁波，造成外部及内部干扰。电磁干扰的存在，使产品输出噪声增大，工作不稳定，甚至完全不能工作。

为了保证产品在电磁干扰的环境中能正常工作，要求采取各种屏蔽措施，提高产品的电磁兼容能力。

1.2.2 电子产品的生产及使用要求

1. 使用要求

(1) 产品的体积与重量

电子产品得以广泛使用的重要原因之一是体积小、重量轻，因此减小产品的体积和重量，具有重要的意义。在某些情况下，设备的体积和重量起着决定性的作用，如军用电子产品，减小其体积重量就直接影响着部队的战斗力和装备使用的灵活性。

各种不同用途对体积重量提出了不同的要求，如野战部队背负式通信机，其宽度不应超过人的双肩宽度（平均约为 400mm），高度为背负时不能碰到臀部（平均约为 500mm），其重量不超过 18kg。又如人造卫星上用的电子产品，其体积重量有极严格的要求，任何一部分体积增大，就意味着减少其他设备的体积。此外，卫星的重量和发射火箭的起飞重量有严格的比例。卫星的重量每增加 1kg，火箭的燃料就多耗费数吨。

各种运载工具如汽车、坦克、飞机、舰船等，由于安装各种产品的空间有限和操纵控制的需要，对电子产品的体积重量有较严格的要求。一般说来，空用设备的要求最高，其次是各种车辆，再次是各种舰船。飞机座舱容积有限，所用的各种电子产品的体积重量尽可能做得小。汽车、坦克用电子产品的体积要求和空用相似，重量要求则可放宽。舰船则要求更

宽。

电子产品工作时，会受到各种机械因素的影响。为了减少冲击、碰撞、振动和加速度的破坏作用，减少其体积重量会收到良好的效果。因为，当重量减少时其质量也将减小，如果施加的加速度一定，则对产品的破坏力就会减小。

(2) 产品的操作与维修

电子产品的操纵性能如何，是否便于维护修理，直接影响到产品的可靠性。因此，在结构设计时必须全面考虑。

对电子产品的操纵要求，随具体产品和使用场所而变化。原则上可归纳为以下几点要求：

为操纵者创造良好的工作条件。例如设备不会产生令人厌恶的噪声，且色彩调和，给人以好感。安装位置要适当，令操作者精神安宁、注意力集中，从而提高工作质量。

设备操作简单，能很快进入工作状态。

设备安全可靠，有保险装置。当操纵者发生误操作时，不会损坏设备，更不能危及人身安全。

控制机构轻便，尽可能减少操纵者的体力消耗。读数指示系统清晰，便于观察且长时间观察不易疲劳，也不损伤视力。

电子设备维护修理是否方便，尤其对于军用产品甚为重要，所以在产品设计时，必须充分考虑维护修理要求。从维护方便出发，对结构设计提出以下要求：

在发生故障时，便于打开维修或能迅速更换备用件。如采用插入式和折叠式结构，快速装拆结构以及可换部件式结构等。

可调元件、测试点应布置在设备的同一面；经常更换的元器件应布置在易于装拆的部位；对于电路单元应尽可能采用印制板并用插座与系统连接。

元器件的组装密度不宜过大，即体积填充系统在可能的条件下应取低一些（一般最好不超过 0.3），以保证元器件间有足够的空间，便于装拆和维修。

设备应具有过负荷保护装置（如过电流、过电压保护），危险和高压处应有警告标志和自动安全保护装置（如高压自动断路门开关）等，以确保维修安全。

⑤设备最好具备监测装置和故障预报装置，能使操纵者尽早地发现故障或预测失效元器件，及时更换维修，以缩短维修时间并防止大故障出现。

2. 生产要求

(1) 生产条件对电子产品的要求

任何电子产品在它的研制阶段之后都要投入生产。生产厂的设备情况，技术和工艺水平，生产能力和生产周期以及生产管理水平和因素都属于生产条件。产品如要顺利地投产，必须满足生产条件对它的要求，否则，就不可能生产出优质的产品，甚至根本无法投产。

生产条件对产品的要求，一般有以下几个方面：

产品中的零件、部件、元器件的品种和规格应尽可能地少，尽量使用由专业厂生产的通用零部件或产品。因为这样便于生产管理，有利于提高产品质量并降低成本。

②产品中的机械零部件，必须具有较好的结构工艺，能够采用先进的工艺方法和流程。原材料消耗低，加工工时短，例如零件的结构、尺寸和形状便于实现工序自动化。以无屑加工代替切削加工。提高冲制件、压塑件的数量和比例等等。

产品中的零部件、元器件及其各种技术参数、形状、尺寸等应最大限度地标准化和规格化。还应尽可能用生产厂以前曾经生产过的零部件，充分利用生产厂的先进经验，使产品具有继承性。

产品所使用的原材料，其品种规格越少越好，应尽可能少用或不用贵重材料，立足于使用国产材料和来源多、价格低的材料。

⑤产品（含零部件）的加工精度要与技术条件要求相适应，不允许无根据地追求高精度。在满足产品性能指标的前提下，其精度等级应尽可能低。装配也应简易化，尽量不搞选配和修配，力求减少装配工人的体力消耗，同时也便于自动流水生产。

(2) 经济性对电子产品的要求

电子产品的经济性有两方面的内容：使用经济性和生产经济性。

使用经济性包括产品在使用、贮存和运输过程中所消耗的费用，其中维修费所占的比例最大，电源费次之。

生产经济性是指生产成本。它包括生产准备费用、原材料和辅助材料费用、工资和附加费用、管理费用等。

为了提高产品的经济性，在设计阶段就应充分考虑以下几个方面：

研究产品与部件技术条件，分析产品设计参数，研讨和保证产品性能和使用条件，正确制定设计方案，这是实现产品经济性的首要环节。

根据产量确定产品结构形式和生产类型。产量的大小决定着生产批量的规模，生产批量不同，其生产方式的类型也不同，因而其生产经济性也不同。

运用价值工程观念，在保证产品性能的条件下，按最经济的生产方法设计零部件，选用最经济合理的原材料和元器件，以求降低产品的生产成本。

全面构思，周密设计产品的结构，使产品具有良好的操纵维修性能和使用性能，以降低设备的维修费用和使用费用。

1.3 电子产品的可靠性

1.3.1 可靠性概述

可靠性是反映任何产品，包括电子产品质量好坏的综合性指标，了解、掌握和使用可靠性技术，不仅与设计、研制、生产有密切关系，而且对产品的使用、保管和维修亦同样重要。可靠性研究始于 20 世纪初期，经不断努力，直到 20 世纪 50 年代才奠定了可靠性研究的基础。20 世纪 60 年代后，可靠性普及到质量统计和质量管埋，现在更是上升到质量保证体系，其地位日趋重要。

1. 可靠性概念

可靠性是指产品在规定的时间内和规定的条件下，完成规定功能的能力。可靠性是产品质量的一个重要方面，通常所说的产品质量好，包含两层意思：一是达到预期的技术指标；二是在使用过程中很可靠。如果产品的技术指标先进，但可靠性差，就会失去实际使用价值。

产品的可靠性是与“规定的条件”分不开的。规定条件包括使用时的应力条件（电气的

和机械的)、工作环境和维护条件、贮存条件等。规定条件不同,产品的可靠性也不同。例如,同一个半导体器件,使用时的输出功率不同,其可靠性也不同。一般的规律是使用输出功率越小,其可靠性越高。又如,同一台电子产品在实验室使用和野外使用,其可靠性相差很大。一般说来,环境条件越恶劣,产品的可靠性越低。

产品的可靠性还与“规定的时间”密切相关。一般说来,产品经过老化后,有一个较长的稳定使用期,以后随着时间的延长可靠性下降,时间越长,可靠性越低。

产品的可靠性是以完成“规定的功能”来衡量的。一个产品往往具有若干项规定的功能,这里所说的完成规定的功能是指全部,而不是其中一部分。产品只有完成规定的全部功能,才能被认为可靠。

产品在工作中常常因各种偶然因素,如元器件突然损坏,应力(电负荷、温度、机械影响等)突然改变,维护或使用不当等的影响而失效。由于这些失效的原因具有偶然性,所以对某一个具体的产品,在规定的条件和时间内能否完成规定的功能,是无法预先知道的,这是个随机事件。大量随机事件中,包含着一定的规律性,随机事件发生的可能性大小可以用概率来表示,即我们虽无法准确地知道产品出现失效的时刻,但可以求出产品在规定的条件和时间内完成规定功能的概率,所以,产品的可靠性可以用概率的形式表示。

2. 可靠性主要指标

(1) 可靠度(不失效率)

可靠度是指产品在规定条件下和规定时间内,完成规定功能的概率,通常用 $R(t)$ 表示。

$$R(t) = \frac{N-n}{N} \times 100\%$$

式中 $R(t)$ ——产品在时间 t 内正常工作的概率;

N ——试验样品数;

n ——规定试验时间 t 内故障数。

试验样品按规定抽取,不可能无穷多,一般有足够的数量即可。其物理意义是:在试验总数中扣除产品故障数,亦即到某个试验期时,仍然完好的产品数与试验产品总数的比例,即完好产品(不失效)的概率。

由于 $R(t)$ 是一个概率,其值为

$$0 \leq R(t) \leq 1$$

在试验开始时, $R(0) = 1$, 产品全部完好,随着试验期的延长, $R(t) < 1$, 即出现了失效产品。试验一直延续下去,直到 $R(\infty) = 0$, 产品全部到达寿命终止期。因此, $R(t)$ 越接近于 1, 表示可靠度越大。

(2) 故障率

故障率是指产品在规定条件下和规定时间内,失去规定功能的概率,通常用 $F(t)$ 表示。它与可靠度是对立事件。二者的关系是:

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

因此

$$F(t) = \frac{n}{N} \times 100\%$$

$F(t)$ 越接近于 1, 表示产品故障率越高。

(3) 平均寿命

对于不可修复和可修复产品, 其平均寿命有不同含意。对不可修复的产品, 它是指产品发生前的工作或储存时间的平均值, 记做 MTTF。

$$MTTF = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i$$

式中 N ——试验样品数;

t_i ——第 i 个产品无故障工作时间。

对可修复的产品而言, 平均寿命是指两次相邻故障间隔时间的平均值, 即平均无故障工作时间, 记做 MTBF。

$$MTBF = \frac{T}{n} = \frac{\sum_{i=1}^N T_i}{\sum_{i=1}^N n_i}$$

式中 T ——总运行时间;

n ——故障的次数。

(4) 失效率 (瞬时失效率)。

失效率是指产品工作到 t 时刻后的一个单位时间内的失效数与在 t 时刻尚能正常工作的产品数之比, 用 $\lambda(t)$ 表示, 即

$$\lambda(t) = \frac{n(t + \Delta t) - n(t)}{[N - n(t)] \Delta t}$$

式中 N ——试验样品数;

$n(t)$ ——到时刻 t 时的失效数;

$n(t + \Delta t)$ —— t 时刻后, 在 Δt 时间间隔内失效数。

失效率越低, 产品的可靠性越高, $\lambda(t)$ 用单位时间的百分数表示。常用 $1 \times 10^{-6} / 1000h$ (或 $1 \times 10^{-9} / h$) 做失效率单位。意即 100 万个元件工作 1000 小时后, 出现一个失效元件, 称为 1 菲特。

(5) 平均修复时间

该项指标反映了产品的可维修度, 是指平均一次故障所需的修复时间。记做 MTTR。

$$MTTR = \frac{T_R}{n} = \frac{\sum_{i=1}^N T_{Ri}}{n}$$

式中 n ——故障次数;

T_R ——修复时间总和。

3. 可靠性分类

产品的可靠性可分为以下三类:

(1) 固有可靠性

固有可靠性是指产品在设计、制造时内在的可靠性。影响固有可靠性的因素很多, 对电子产品来说, 主要有产品的复杂程度, 电路和元器件的选择与应用, 元器件的工作参数及其可靠程度, 机械结构和制造工艺等。对元器件来说, 主要有原材料的品质、制造工艺、工作参数等。必须指出, 产品的固有可靠性在很大程度上依赖于元器件的可靠性。产品越复杂,

所用的元器件越多，则产品的固有可靠性越低。如元器件的可靠性为 0.995 时（指平均数），具有 10 个元器件的产品的可靠性为 0.96；而具有 100 个元器件的产品的可靠性只有 0.60。

(2) 使用可靠性

使用可靠性是指使用和维护人员对产品可靠性的影响，它包括使用与维护的程序及产品使用操作方法正确性以及其他人人为的因素。使用可靠性在很大程度上依赖于使用产品的人。熟练而正确的操作，及时的维护和保养，都能显著提高使用的可靠性。

(3) 环境适应性

环境适应性是指产品所处的环境条件对可靠性的影响，它包括环境温度、湿度、气压、振动、冲击、霉菌、烟雾以及贮存和运输条件的影响。提高产品的环境适应性，主要是对产品采取各种有效的防护措施。

1.3.2 可靠性设计的基本原则

电子产品可靠性设计是一个涉及面非常广泛的问题，它涉及到系统的可靠性模型，可靠度和维修的要求、预计和分配，可靠性费用设计和各种保证系统可靠性的技术措施。这里主要讨论产品可靠性设计思想和部分技术措施。

1. 设计方案的简化

从系统可靠性的角度来看，系统愈复杂，所用的元器件愈多，则系统的可靠性就愈低。因此，在满足系统性能要求的前提下，尽量简化设计方案，减少所用元器件数目是提高系统可靠性的重要环节。同时也要尽量选用可靠性高的元器件。为了合理地实现简化，应充分注意下列原则：

- (1) 综合利用硬件与软件的功能，充分发挥软件的功能，以减少硬件的数量。
- (2) 对指标和性能的确定要合理，避免盲目追求高性能和高指标。
- (3) 积极慎重地采用新技术、新器件。
- (4) 尽量采用经过优化设计和实际考验的标准电路单元。
- (5) 尽可能采用集成度较高的集成电路。
- (6) 对数字逻辑电路要进行简化设计。
- (7) 尽可能采用数字电路来代替线性电路。

2. 可靠性与经济性关系

为了提高产品的可靠性，就要在材料、工艺、设备和管理等方面采取相应措施，这就导致生产和科研费用的增加，但使用维修费用却随着可靠性的提高而降低，因而总的费用却不一定增加。如果可靠性指标定得适当，总费用可达最低水平。反之，若可靠性指标低，就必须增大使用和维修费用，总费用仍有可能增加，使经济性变差。它们的相互关系可参见图 1.1。

3. 元器件可靠性与产品可靠性

(1) 元器件可靠性

元器件可靠性通常是用失效率来表征。实践发现，普通元器件和半导体元器件的失效规律有相同之处，但也不完全相同。了解元器件的失效规律，对于正确使用元器件，从而提高

产品可靠性是很有益的。

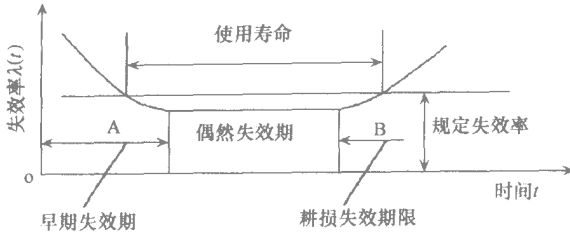


图 1.1 典型普通元器件失效曲线

早期失效期：由于设计、制造上的缺陷等原因而发生的失效叫早期失效。发生早期失效的时间叫早期失效期，其特点是失效率高，但随着元器件工作时间的增加而失效率迅速降低。通过对原材料和生产工艺加强检验和质量控制，可以大大减少早期失效比例。在生产中对元器件进行筛选老化，可使其早期失效大大降低，以保证筛选后的元器件有较低的失效率。

偶然失效期：产品因偶然因素发生的失效叫偶然失效。产品在早期失效之后，失效主要表现为偶然失效的时期叫偶然失效期，也称随机失效期。其特点是失效率低而基本稳定，可以认为失效率是一个常数，与时间无关。偶然失效期时间较长，是元器件的使用寿命期，研究这一段的失效，意义最大。

耗损失效期：产品在使用的后期，由于老化、疲劳、耗损等原因引起的失效叫耗损失效。主要发生耗损失效的时间叫耗损失效期，又叫老化失效期。其特点是失效率随时间迅速增加。到了这个时期，大部分元器件都开始失效，产品迅速报废。在电子产品中，所有元器件和组件都不能工作于耗损失效期。

元器件的可靠性：一般元器件的可靠性通常用失效率表示。失效率用 $\lambda(t)$ 表示。由于元器件都工作在偶然失效期，其失效率为常数，即

$$\lambda(t) = \lambda = \text{常数}$$

则可靠性用可靠度 $R(t)$ 表示为

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

上式说明了正常工作概率（可靠度）在时间上是按指数衰减的。

使用条件对元器件可靠性的影响：元器件的使用条件包括工作环境条件和负荷条件。工作条件不同元器件的失效率变化很大，有时可相差几百倍，一般地说，所处的环境条件越恶劣，其失效率越大。

(2) 产品可靠性

一个复杂的产品可以看成是一个系统，是由若干个子系统或部件组成，而每个子系统或部件又由许多元器件组成。我们可根据元器件的可靠性求得系统的可靠性，也可根据系统的可靠性要求分配各子系统（或部件、元器件）的可靠性。

系统和子系统（或部件、元器件）之间的可靠性关系可以分为串联系统和冗余系统（备份系统）两大类。

4. 可靠性与可维修性

在实际工作中，产品出了故障就报废的比例不是很高的，因此说产品寿命不能完全代表可靠性。产品出现故障若能及时排除，仍能继续可靠地使用，通常把能够修复的产品的元器

元器件的失效规律：普通电子元器件的失效规律是阻容元件、继电器等普通元器件，在大量使用后，发现它们有相似的失效规律，图 1.1 表示了典型元器件的失效率与工作时间的关系。这条关系曲线就是通常所说的船形或浴盆曲线。它划分为三个阶段。

早期失效期：由于设计、制造上的缺

件、零部件所具备的维修难易程度或性质视为维护保养性，也是可靠性的重要因素之一。所谓可维修是指产品零部件、元器件经修理使之维持可靠性而采取的措施。作为衡量的尺度，用有效工作时间比例 A 来表征，即

$$A = \frac{\text{工作连续时间}}{\text{工作连续时间} + \text{工作间断时间}}$$

当产品的部件、元器件出现足以毁坏设备或危及操作者的人身安全的故障时，报警、自动关机、自动保护等安全装置应该启动，以保证设备和人身的安全。这些问题在可靠性设计时就要周密考虑，切实解决。这种为提高系统可靠性而加设的安全装置是技术措施的一部分，属于可维修性的内容。

5. 加工工艺的可靠性

工艺加工必须保证产品元器件在加工过程中，不致受到热力的、机械的和电气的损伤，并严格按照工艺文件的要求进行加工。

为保证印制电路板的焊接质量和装接效率，应采用波峰焊接工艺技术；元器件筛选应按筛选工艺操作，不应过温筛选，以免损伤元器件；采取必要的措施，保证产品表面不受机械伤和化学腐蚀；用必要的工艺装置来满足产品加工过程中的各种电气指标的测试要求，使之达到最佳状态，以免受电气的冲击或过载的影响。应当把可靠性设计与加工的可靠性密切配合起来，以保证产品的质量要求。

1.3.3 提高电子产品可靠性的途径

1. 从产品设计制造方面提高可靠性

(1) 提高元器件的可靠性

电子产品的硬件故障大都直接以元器件的各种损坏或故障的方式表现出来。一方面是由于元器件本身的缺陷造成的，而另有相当一部分是对元器件选用不当所致。因此产品在生产中要正确选用元器件，所用元器件必须经过严格检验和老化筛选，以排除早期失效的元器件，然后将合格可靠的元器件按工艺要求装配。

根据元器件在使用中常见的问题，在选用时应充分注意下列原则：

根据电路性能的要求和工作环境条件选用合适的元器件，使用条件不得超过元器件电参数的额定值和相应的环境条件并留有足够的富余量。

尽可能压缩元器件的品种和规格数，提高它们的复用率。

除特殊情况外，所有电子元器件都应按不同要求经过必要的可靠性筛选后，才能用到产品中去。

仔细分析比较同类元器件在品种、规格、型号和制造厂商之间的差异，择优选用，并注意统计、积累在使用和验收过程中元器件所表现出来的性能与可靠性方面的数据，作为以后选用的重要依据。

对电子元器件进行筛选是提高电子产品可靠性的一种行之有效的措施。筛选的目的是从一批元器件中选出可靠性较高的元器件，淘汰有潜在缺陷而导致早期失效的产品。理想的筛选是剔除所有潜在缺陷的元器件而不使良好的元器件受到损伤。但实际上做不到这一点，这不仅有技术上的困难，更有经济上的问题。因此，要用最经济有效的方法来达到规定的可靠

性。

筛选方法的效果通常用筛选效率 η 表示。如果一批产品的总数为 N ，其中早期失效产品为 R 个，通过某种方法筛选后，共淘汰了 n 个产品，其中包括早期失效产品 r 个，则

$$\eta = \frac{r}{R} \left(1 - \frac{n-r}{N-R} \right)$$

式中， η 的值在 $0 \sim 1$ 之间。 r/R 代表应该淘汰的早期失效产品与实际被淘汰的比率。 $(n-r)/(N-R)$ 代表不应该淘汰的正常产品与被误淘汰的比率。前—比率愈大愈好，后—比率愈小愈好。当前者为 1，后者为 0 时， $\eta = 1$ ，表示这一筛选方法已达到理想的要求。由于 R 、 n 、 r 这些数值都具有随机性，因此，各种筛选方法的 η 值不是通过一两次试验就可以确定的，而必须进行大量筛选试验，积累足够的数据来进行统计计算才能达到。

由于各种电子设备和电子装置使用的元器件的类别、品种和规格繁多，筛选条件很难全部建立，一般制造厂都把主要精力放在半导体器件的可靠性筛选上，特别是对集成电路的筛选。

筛选工作可以委托制造厂或有关研究试验单位进行，也可以自己做，根据需要规定一些项目进行筛选。根据国内筛选工作的经验，通过有效的筛选可以使元器件的总失效率下降 1~2 个数量级。

(2) 合理使用元器件

只有合理使用元器件，才能保证固有可靠性。元器件的工作电压、电流不能超额使用，应按规范降额使用。尽量防止元器件受到电冲击，装配时严格执行工艺规程，免受损伤。

降额使用就是元器件在低于其额定值的应力条件下工作。合理的降额可以大幅度地降低元器件的失效率。因此，降额使用已成为提高电子产品可靠性的最有效的措施之一。对元器件有影响的应力包括：时间、温度、腐蚀、机械应力（直接负荷、冲击、振动等）和电应力（电压、电流、频率等）等等。大量元器件在额定条件下工作时，所观察到的平均失效率被称为额定失效率、基础失效率或通用失效率。当元件的工作应力高于其额定应力时，失效率增高，反之，一般都下降。

表 1.1 所列的为电子产品中常用元器件的推荐降额范围。

表 1.1 常用元器件的推荐降额

| 元器件种类 | 电阻器 | | 电容器 | | 半导体器件 | | 电抗器 | | 继电器 | 接插件 | 微电机 |
|-------|-----|--------------|-----|-------|-------|-------|------|--------------|---|-------|---------|
| 内容 | T | S_p | T | S_v | S_p | S_v | T | S_I | S_I | S_I | S_p |
| 范围 | <45 | 0.1 ~ 0.6 | <50 | <0.6 | <0.5 | <0.7 | <130 | 0.6 ~ 0.7 | 白炽灯负载 ≤ 0.15 电感性负载 ≤ 0.3 | 同左 | 0.3~0.8 |

符号说明： T ——工作环境温度（℃）； S_p ——功率降额系数； S_v ——电压降额系数； S_I ——电流降额系数

(3) 电子产品的合理设计

产品设计的目标应是最大限度地满足用户的要求，即以最低的购置费用，在尽可能长的时间内得到可靠的使用效果。设计制造电子产品的原则是提高其技术经济指标，所以先进的技术指标和良好的可靠性、工艺性、使用性是达标的基本保证。

合理设计电路，尽可能选用先进而成熟的电路，减少元器件的品种和数量，多用优选

的和标准的元器件，少用可调元件。采用自动检测与保护电路。为便于排故与维修，在设计时可考虑适当的监测点，以利查找与修复。

②合理地进行结构设计和严格生产工艺。产品在进行结构设计时，要充分考虑当前电子工业发展中的新工艺、新材料、新技术，尽可能采用生产中较为成熟的结构形式，有良好的散热、屏蔽及三防措施，防振结构要牢靠，传动机构灵活、方便、可靠，整机布局合理，便于装配、调试和检修。

加强生产中的质量管理。

2. 从使用方面提高可靠性

产品出厂后，都附有合格证、说明书，一般还附有产品使用情况的记录卡、维修卡等。另外产品的贮存、运输等条件也都有条文规定。因此，对使用者来说，应按规定进行贮存、保管、使用和维修，使已定的可靠性指标实现。

合理贮存和保管。产品的贮存和运输必须按照规定的条件执行，不然的话，会在贮存和运输的过程中受到损伤。保管也是如此，必须按照规定的范围保管，如温度、湿度等都要保持在一定范围之内。

合理使用。在使用产品之前必须认真阅读说明书，按规定条件操作。

定期检验和维修。定期检验可免除仪器在不正常或不符合技术指标时给使用造成差错，也可避免产品长期带病工作以致造成严重损伤。

本章小结

电子产品具有鲜明的特点，工艺技术在电子产品生产中的重要性十分突出。电子产品结构工艺随电子技术的发展而发展。

设计制造电子产品的基本要求有气候条件方面的、生产方面的及使用方面的要求，各项要求的实施为电子产品质量提供了可靠的保证。

电子产品的可靠性是反映电子产品质量的综合指标。可靠性有固有可靠性、使用可靠性及环境适应性三类。可靠性的主要指标有可靠度、故障率、平均寿命、失效率及平均修复时间等。提高可靠性的途径可从产品设计制造及使用两方面去考虑。

习 题

1. 电子产品主要有哪些特点？
2. 气候条件包含哪些因素？它们对电子产品有何影响？
3. 机械条件包含哪些因素？它们对电子产品有何影响？
4. 生产条件对电子产品提出哪些要求？
5. 操作、维修对电子产品提出哪些要求？
6. 工艺工作在生产过程中有什么重要意义？
7. 什么是可靠性？产品的可靠性包括哪些内容？
8. 提高电子产品的可靠性一般采用哪些措施？

第 2 章 电子产品的防护

2.1 气候因素的防护

由于电子产品使用的范围非常广泛，其工作环境和条件也就极为复杂多样，它要受到各种环境和气候条件的影响。对于气候因素而言，主要是受潮湿、盐雾、霉菌的影响，所以对气候因素的防护也主要是防潮湿、防盐雾、防霉菌，俗称为三防。

2.1.1 潮湿的防护

1. 吸湿机理

空气中的潮湿是水在热的作用下蒸发形成的水蒸气，随着温度的升高，水蒸气逐渐增多直到饱和状态。当水蒸气过饱和时，它将凝聚成小水滴。处在潮湿中的物体，由于空气中水蒸气的分子运动，必然有一部分水分子吸附在物体表面上，形成一层水膜，随着空气相对湿度的增高，水膜厚度也增大。当相对湿度达 65% 时，处于空气中的一切物体表面都会覆盖着一层 $0.001\sim 0.01\mu\text{m}$ 的水膜；当相对湿度增大到 90% 时，水膜厚度可达 $10\mu\text{m}$ 。一切物体的吸湿，都是由这层水膜引起的。

物体的吸湿可以有以下四种形式：

(1) 扩散：在高湿环境中，由于物体内部和周围环境的水汽压力差较大，水分子在压力差的作用下，向物体内部扩散，使水分子进入物体内部。扩散随着温度升高而加剧。

(2) 吸收：有些材料本身具有缝隙和毛细孔，如高分子塑料的分子间均存在一定的空隙，纤维材料则有众多的毛细孔。当这种材料处于潮湿空气中时，材料表面的水膜分子由于毛吸作用，进入材料内部。

(3) 吸附：由于物体表面的分子对水分子具有吸引力，当物体处于潮湿空气中时，水分子就会吸附到物体表面上，形成一层水膜。含有碱及碱土金属离子、非金属化合物离子以及离子晶体化的固体材料，对水分子有较大的吸附能力。

(4) 凝露：当物体表面温度低于周围空气的露点时，空气中的水蒸气便会在物体表面上凝结成水珠，在物体表面形成一层很厚的水膜。在高温、低温交替循环下，可能造成材料内部的内凝露，严重时会使材料内部积水。

扩散和吸收使水分子进入材料内部，因而会使材料的电阻率下降。某些非金属材料分子间的亲和力小于对水分子的亲和力，当水分子进入材料内部时，将在材料内部产生溶解作用，使材料组织发生变化并开始膨胀。

水分子以扩散和吸收的形式进入物质内部的程度，可以用吸湿性（吸潮性）和透湿性等指标表示。

吸湿性——它以材料在温度为 20 和相对湿度为 100%（或 97%~100%）的空气中经过 24 小时后所增加重量的百分数来表示。吸湿性与材料的表面性质有关。一般说来，材料

表面有缝隙和毛细孔以及分子间有较大的空隙时，其吸湿性也较大。有时也可以用吸水性来表示材料吸湿的能力。吸水性以材料放在温度为 $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ 的蒸馏水中经过 24 小时后所增加重量的百分数来表示。吸湿性和吸水性具有相同的物理意义，只不过表示的方法不同而已。

透湿性——材料能被水蒸气（或水分子）透过的能力。透湿性用透湿率来表示，即在单位气压（mmHg）下，材料厚度为 1cm 时，每小时透过水蒸气的微克数，其单位为 $\mu\text{g}/\text{cm}\cdot\text{h}\cdot\text{mmHg}$ 。透湿性与材料性质及密实程度有关。研究材料的透湿性对正确选择防潮保护涂层有重要的意义。金属和玻璃可认为不透湿（其透湿率为零），而石蜡、沥青、聚乙烯等材料透湿性都很小。

吸附和凝露会使材料表面形成一层水膜，而使材料的表面电阻率下降。材料表面能否被水润湿，对材料表面电阻率有很大影响，一般说来，材料表面被水润湿的程度越大，其表面电阻下降也越大。材料被水润湿的程度可用润湿角 α 来表征，如图 2.1 所示。



图 2.1 固体表面水的润湿角

当润湿角 $\alpha < 90^\circ$ 时，材料可被认为是亲水性的；当润湿角 $\alpha > 90^\circ$ 时，材料可被认为是憎水性的。

亲水性——当物体表面对水分子的吸引力大于水的表面张力时，此时润湿角 $\alpha < 90^\circ$ ，如图 2.1 (a) 所示， α 角越小，表示物体的亲水性越强。亲水性的物体容易使水在其表面形成一层水膜，水膜使物体润湿，并使水沿着物体表面向内部渗入。

憎水性——当物体表面对水分子的吸引力小于水的表面张力时，此时润湿角 $\alpha > 90^\circ$ ，如图 2.1 (b) 所示， α 角越大，表示物体憎水性越强。憎水性物体使水在其表面上收缩成不相连的小水珠，物体表面不易被润湿，水分子也不易渗入物体内部。

扩散、吸收、吸附、凝露等四种吸湿机理可能同时出现，也可能出现其中某一两种，凡是以这样方式吸湿的过程，都称为潮湿直接侵入，这是最基本的吸湿方式。此外还有另一种吸湿方式，即“呼吸”方式，它是指在温度交替变化和具有一定的气压差情况下，潮湿空气进入保护层、容器、软管及有缺陷的密封等过程。“呼吸”吸湿是一个在短时间内不易为人们所察觉的缓慢过程，对于要求较高的防潮密封，“呼吸”作用不容忽视。

2. 防潮湿措施

防潮湿措施有憎水处理、浸渍、灌封、密封等方法。

(1) 憎水处理

亲水物质的吸湿性和透湿性大，可以通过憎水处理改变其亲水性，使它的吸湿性和透湿性降低。

用硅有机化合物蒸汽处理亲水物质，可以提高憎水能力，方法是把硅有机化合物盛在容器中，放到加热器中加热到 $(50 \sim 70)$ 让其挥发，使被处理的元件、零件在蒸汽中吸收有机硅分子，然后在 $(180 \sim 200)^\circ\text{C}$ 烘烤。有机硅分子深入元件、零件所有的细孔、缝隙并与水化合后，在元件、零件表面形成憎水性的聚硅烷膜或者使某些物质发生化学变化（如羟基的醚化）而使材料变成憎水性。

纤维材料（纤维、纸、纸胶板、胶合板、木材、织物等）的憎水处理可采用烷基氯硅烷和烷基取代的正硅酸酯等硅油处理。玻璃和陶瓷的憎水处理，可采用乙基三氯硅烷

$C_2H_5SiCl_3$ 或二乙基二氯硅烷 $(C_2H_5)_2SiCl_2$ 与乙基三氯硅烷的混合物蒸汽来处理。此外，也可用二甲基二氯硅烷 $(CH_3)_2SiCl_2$ 或烷基氯硅烷对玻璃和陶瓷进行憎水处理。

(2) 浸渍、蘸渍

浸渍是将被处理的元件或材料浸入不吸湿的绝缘液中，经过一段时间，使绝缘液进入材料的小孔、毛细管、缝隙和结构间的空隙，从而提高元件材料的防潮湿性能以及其他性能。浸渍有两种方法：一般浸渍和真空浸渍。一般浸渍就是在大气压下进行浸渍处理；真空浸渍则是在具有一定真空度（10mmHg）的密闭容器中进行浸渍处理。真空浸渍的效果好于一般浸渍，对于关键性的元件多采用真空浸渍，如变压器等。此外，浸渍还可以提高材料或元件的抗电强度和机械强度，以及因浸渍排除热导率低的空气而改善制品的导热性，使其寿命得以延长。

除防潮湿外，浸渍还有以下几方面作用：

蘸渍是把被处理的材料或元件短时间（几秒钟）地浸在绝缘液中，使其表面形成一层薄绝缘膜。也可以用涂覆的办法在材料或元件表面上涂上一层绝缘液膜。蘸渍和浸渍的区别在于：蘸渍只是在材料表面上形成一层防护性绝缘膜，而浸渍则是将绝缘液深入到材料内部。

蘸渍适用于未经过处理的、不适宜于浸渍的材料及元件，也可以用于曾经浸渍过的，但需进一步增强其防潮性能的材料及元件。蘸渍能增加材料及元件的外表美观。蘸渍的防潮性能比浸渍差。重要的、防潮要求高的材料和元件一般不采用蘸渍。

浸渍和蘸渍所用的绝缘漆品种很多，其性能各有不同，常用的有以下几种：

酚醛绝缘漆。如 1031 丁基酚醛醇酸漆，它的流动性和干透性良好，漆膜的耐热耐潮和介电性能较高，可供线圈浸渍用，但机械强度较差。

一般零部件用高频酚醛清漆浸渍。高频酚醛清漆浸渍又称胶木化。胶木化就是将零件预热到 100 消除潮气，然后趁热浸渍，最后在 120 时烘干。零件胶木化后，强度提高，耐热性好，但变得硬而脆。若要求较高时，胶木化可进行真空浸渍。由于胶木化的固化温度较高，故丝、纱包线的线圈不宜做胶木化处理。

三聚氰胺醇酸绝缘漆。如 1032 三聚氰胺醇酸漆，其热固化性好，漆膜的附着力强并具有较高的耐热耐潮和介电性能，可作为工作于湿热地带的线圈、玻璃布层压制品和塑料表面的浸渍漆。类似性质和用途的还有 EA8340 三聚氰胺环氧醇酸漆。

有机硅聚酯浸渍漆。如 1050 有机硅浸渍漆具有良好的热固性和浸渍能力，漆膜具有高的耐热、耐寒和介电性能，供长期工作温度为 180℃ 下和短期工作温度为 250~300 的电器线圈做浸渍用。此外还有 1051、1052 和 1053 等有机硅浸渍漆，具有较高的耐热性和绝缘防潮性，可作为玻璃丝包线及玻璃布浸渍用并可做晶体管处壳的保护层。

环氧酯无溶剂绝缘漆。如 H30-1 环氧酯无溶剂绝缘烘漆，具有优良的附着力，耐油性和柔韧性也较好，可作为高强度漆包线、玻璃丝包线绕制的线圈和变压器真空浸渍材料。此外还有 H30-2 是加有带溶剂及丁醇稀释剂的环氧脂绝缘漆，其性能大体与 H30-1 相同，也是较好的浸渍材料。

(3) 灌封或灌注

在元器件本身或元器件与外壳间的空间或引线孔中，注入加热熔化后的有机绝缘材料，冷却后自行固化封闭，此种工艺叫灌封或灌注。

灌封的防潮性能是由灌封材料或混合物的物理性、灌注层厚度、通过灌注层的引线数量等因素决定的。由于灌封材料与引线间因线膨胀系数的差异形成的毛细管会降低防潮性能，

因此可将引线做成螺旋或多次弯曲形状，以延长潮气沿毛细管侵入的路程，从而提高灌封的防潮性能。常用的灌封材料有环氧树脂、石蜡、沥青、油、不饱和聚酯树脂、硅橡胶等。环氧树脂有高温固化和室温固化两种。高温固化的灌封防潮性能好且强度高，但收缩率大，对线圈的电感 L 和 Q 值影响大；室温固化的灌封收缩率小，对线圈的电感 L 和 Q 值影响小，但防潮性能较差。线圈（如中周、微调电感、滤波器、疏密线圈等）常用聚乙烯醇缩丁醛胶来灌封或灌注，起到防潮和固定作用。目前采用有机硅橡胶、有机硅凝胶等灌封材料，能起到保护电子产品免受潮湿、霉菌、盐雾、灰尘的侵蚀，并能起防震、防冲击的作用。

硅泡沫灌封材料除具有一般硅橡胶的特点外，还具有比重小、弹性好、高温低温都可应用和工艺简单的特点，适用于有重量限制和有绝热要求的元器件的灌封。有机硅灌封材料的另一特点是易于修缮，发生故障时，可切去一部分，修缮完之后，灌入新料熟化后即可恢复原貌。

为了提高元器件的防潮性能，还可以进行塑料灌封，其方法是将元器件装入预先制好的模型中，再将合成材料（如聚丙烯腈，聚甲基丙烯酸甲酯及改性聚苯乙烯等）加热压入模型内，将元器件包封起来。也可用真空热解气相堆积成膜法，在元器件、部件上形成一层合成材料薄膜，达到防潮目的。

浸渍、蘸渍和灌封所用的绝缘材料都具有不同程度的吸湿性，因此潮气通过扩散或“呼吸”作用仍能进入元器件中，但在相对湿度不大的情况下，采用吸湿性很小的绝缘材料，能够有效地防止潮气的进入，使元器件的防潮性能得到提高，所以仍得到广泛应用。

(4) 密封

密封是防止潮气长时期影响的最有效方法。密封就是将零件、元件、部件或一些复杂的装置，甚至整机安装在不透气的密封盒中，这种方法属于机械防潮。密封不仅可以防潮，而且还可以防水、防低气压、防盐雾、防霉、防灰尘。密封结构应用很广泛，例如长途通信电缆的地下增音机、各种水下设备、空间技术设备以及许多新型电子器件如陶瓷滤波器等，多采用金属箱或金属盒密封。当然，也可采用塑料等其他材料密封，密封结构的外表面再用高强度化学涂料进行涂覆或灌封，有的还将密封结构内部抽成真空或填充氮气、氦气等惰性气体或填充挥发性缓蚀剂等，这样不仅在普通大气条件下能达到极为满意的防护效果，即使在湿热带、寒带、地下、水下、高空与其他更恶劣的气候条件下，也能收到良好的防护效果。密封防护比其他防护（如化学涂覆、浸渍、灌封等）方法造价要高，结构和工艺也复杂一些，而且不易小型化。

作为防潮湿的辅助手段，有时可对某些产品用定期通电加热的方法来驱除潮气（比如家用电器不能长期放置不用，否则会由于受潮引起金属腐蚀，电路漏电、短路而造成损坏，所以应该经常通电加热防潮），也可以用吸潮剂吸掉潮气。常用硅胶做吸潮剂，它具有很大的吸水性，可吸收相当于它本身重量 30% 的水分，硅胶吸水达到饱和时呈乳白色或玉色，可在 120~150 的烘箱中烘干后继续使用。但在货物包装中却常用廉价的生石灰做吸潮剂。

(5) 各种防潮措施的适用范围

在结构设计时，对于正常气候条件下工作的元器件、零部件，为了提高某些非金属材料、纤维材料和线圈类元器件的防潮能力、耐热能力、抗电强度以及机械强度等，可采用憎水处理、蘸渍、浸渍处理和灌封处理。对于金属材料的防潮，则多采用表面覆盖。

憎水处理和蘸渍处理只能作为辅助性的防潮手段，它多用来作为其他防潮处理后的辅助处理，以进一步加强其防潮性能。但在防潮要求不高的情况下，也可以单独使用。