

主办单位

- 中国科协学会工作部
- 中国科协普及工作部
- 中国科协继续教育中心
- 中央电视台
- 中国质量管理协会
- 中国电子学会
- 中国仪器仪表学会
- 中国通信学会

牟致忠 编著

机械可靠性

人民邮电出版社

《可靠性工程与管理》电视讲座和函授班教材 九

主办单位	中国科协学会工作部	中国科协普及工作部
	中国科协继续教育中心	中央电视台
	中国质量管理协会	中国电子学会
	中国仪器仪表学会	中国通信学会

机 械 可 靠 性

牟致忠 编著



人民邮电出版社

登记证号(京) 143 号

内 容 提 要

本书系统介绍了机械可靠性的定义、指标,机械可靠性设计,机械系统可靠性,维修性设计,可靠性试验, FMECA 与 FTA 应用,以及设计与分析实例等。

本书内容充实,结合实际,层次清楚,阐述通顺,既有充分的理论基础,又有较高的实用价值,可供从事机械、电子、航空航天等部门机械产品研究、设计、制造、试验、维修的工程技术人员以及有关专业的师生阅读参考。

机 械 可 靠 性

牟致忠 编著

*

人民邮电出版社出版

北京东长安街 27 号

北京广益印刷厂印刷

人民邮电出版社发行

*

开本: 787×1092 1/16 1989 年 8 月第一版
印张: 10¹⁰/16 页数: 85 1993 年 1 月北京第 2 次印刷
字数: 266 千字 印数: 13 001—18 000 册

ISBN 7-115-03816-3/Z·137

定 价: 7.40 元

《可靠性工程与管理》电视讲座和函授班

主办单位

中国科协学会工作部 中国科协普及工作部
中国科协继续教育中心 中 央 电 视 台
中国质量管理协会 中 国 电 子 学 会
中国仪器仪表学会 中 国 通 信 学 会

教育委员会

顾问:

盛树仁 高镇宁 宋季文 刘 恕
张五球 叶柏林 陈保定 马怀祖

主任委员:

宋直元

副主任委员 (以姓氏笔划为序):

丁俐丽 牛田佳 邓震垠 (常务) 朱玉龙
成银生 李传卿 陆廷杰 罗国英 林振申
苑郑民 钟 良 (常务) 魏学兴

委员 (以姓氏笔划为序):

马 林 马桂夫 么子臣 王圣媛 王相龙
宁云鹤 史定华 汪元江 刘宗仁 过元柄
庄异君 陈 刚 陈章豹 牟致忠 何国伟
郎锋军 杨为民 周 济 周维田 杨定亚
林中强 单永铮 茆侍松 陆洪时 徐运忠
张庆龙 殷鹤林 程光辉 傅光民 裘履正

承办教学单位

上海电子学会可靠性与质量管理专业委员会
上海第二工业大学
中国电子产品可靠性与环境试验研究所
《电子技术》杂志社

教研组

组长、教育录像和教材主编：

傅光民

副组长：

裘履正

成员（以姓氏笔划为序）：

马怀祖	史定华	许 康	庄异君	牟致忠
罗 威	林中强	卓礼章	郁时霖	茆侍松
费鹤良	倪正铭	夏春镗		

前 言

可靠性 (Reliability), 是产品的重要质量指标。可靠性高, 意味着寿命长、故障少; 可靠性低, 意味着寿命短、故障多。电视机的平均无故障工作时间, 汽车的平均无故障行驶公里数, 运载火箭的发射成功率等都是产品的可靠性指标。

可靠性工程与管理是 40 年代以来迅速发展起来的新兴综合学科, 涉及数学、物理、化学、电子、机械、环境、管理以及人机工程等各个领域。它致力于研究提高产品可靠性, 包括从原材料、元器件、零部件到整机及系统的各个环节。从研究、设计、制造到使用及维修的全寿命周期, 是一个十分复杂的系统工程。国内外的实践表明, 可靠性工程与管理技术的应用, 为企业与社会带来了巨大的经济效益, 因而引起世界各国的普遍重视与关注, 纷纷投入大量人力物力进行研究和推广应用。产品的可靠性, 已经成为当今国际和国内市场竞争的焦点。

1987 年 9 月, 国家经委、国家机械委、国防科工委、劳动人事部、广播电影电视部、中国科协联合发文决定, 由中国科协、中央电视台、中国质协、中国电子学会、中国仪器仪表学会、中国通信学会联合主办全国性的可靠性工程与管理电视讲座和函授班。中国通信学会为牵头单位, 承担组织工作。上海电子学会可靠性与质量管理专业委员会、上海第二工业大学、中国电子产品可靠性与环境试验研究所、《电子技术》杂志社承办教学工作。聘请上海市第二工业大学可靠性研究室主任傅光民同志、上海自动化仪表研究所高级工程师裘履正同志负责组成教研组, 承担制订电视讲座及函授班的教学大纲, 提出课程设置及详细提纲, 组织编写课本及全套书面教材的工作。经教学双方共同努力, 第一期教学取得了良好成果。

近几年来, 产品可靠性工作开始得到重视和加强, 产品可靠性规划、设计、试验、失效分析、评审、鉴定、指标考核和相应的管理、监督逐步开展, 特别是国标、行 (部) 标和产品质量分等标准中对产品可靠性作为限期必须考核的项目实行以来, 机电产品质量有了一定程度的提高。但是, 发展极不平衡, 我国产品与工业先进国家的同类产品相比, 仍有较大差距。开展可靠性工作要从人才培养入手。为了进一步在全国范围培养大批可靠性工程技术人才和可靠性管理人才, 促进可靠性工作的全面开展, 大幅度提高我国产品可靠性质量, 1992 年 9 月, 人事部、中国科协、机械电子部、国防科工委、广播电影电视部、航空航天部、邮电部、国家技术监督局联合发文决定, 由中国科协学会部、普及部、继续教育中心, 中央电视台和上述四个全国性学会 (协会) 联合主办第二期可靠性工程与管理电视讲座和函授班。中国通信学会为牵头单位, 承担组织工作。为了加强组织领导, 聘请国家计委、国务院电子信息信息系统推广应用办公室、上述发文单位、主办单位和有关院校、科研院所、企业等单位的领导干部、专家、学者组成可靠性工程与管理电视讲座和函授班教育委员会 (第二届)。教学承办单位、教研组负责人同上届。

联合发文指出: “提高产品质量, 是国民经济和社会发展的一项长期战略任务, 在加快改革开放和经济发展的新形势下, 尤为重要。提高产品可靠性是提高产品质量和提高产品社会、经济效益的基础, 也是繁荣市场, 促进出口, 保证产品上台阶, 在商品竞争中赢得主动

权的必要条件。”“各级经济管理部门，各有关部门，各企业和相关的科研、设计、生产、监督、试验、使用、维修等部门，应当把可靠性技术培训列为专业技术人员和管理人员在职教育和岗位培训的一个重要内容，要充分利用举办电视讲座和函授班的有利条件，结合实际情况组织本系统本地区有关人员积极报名参加学习。已经建立继续教育登记制度的单位，可将参加本次教学的学员考试成绩登记入册。并将这次培训作为考核审查可靠性工作开展情况的一个方面的依据。”

根据岗位培训的实际需要，教学分设管理班与工程班。管理班学员是有关企业、研究所以及主管部门的领导干部与管理人员。学员应收看中央电视台第一套节目播出的 22 集电视教学片（每集 50 分钟），自学《可靠性工程与管理电视讲座教材》、《可靠性管理》一书；工程班学员是工程技术人员及可靠性与质量管理工作人员。学员除收看电视讲座，学习《可靠性工程与管理电视讲座教材》、《可靠性数学》、《可靠性物理》、《可靠性管理》外，选学《可靠性设计》、《锡焊技术与可靠性》、《可靠性试验》、《环境试验》、《机械可靠性》等五门课程中的一门。《可靠性教学辅导教材》作为参考。

教学认真贯彻理论联系实际、学以致用方针，注意系统性、实用性，着重阐明物理概念，给出定性分析、定量计算方法及运用实例，避免繁琐的数学推导。内容以民用电子设备为重点，讲授可靠性通用技术，兼顾仪器、仪表、通信、航天、航空、轻工等系统的部分应用实例。通过电视讲座及函授学习，可以帮助学员了解可靠性工程与管理的发展历史与重要意义；掌握可靠性工程与管理的主要工作内容及本岗位的可靠性技术（可靠性设计、制造、试验及管理）；了解部分企业、研究所行之有效的实践经验；从而提高可靠性工程与管理技术水平，提高产品可靠性。为此，教材请国内有较丰富工程与教学实践经验的同志编写，总结国内外富有成效的可靠性工作案例，参考国内外可靠性书刊及论文，有较广泛的适用性和较高的实用性，可作为在职可靠性岗位培训的教材，也可作为大专院校可靠性与质量管理专业的参考教材。

在教材编写与出版以及电视教学片摄制过程中，得到中央有关部委、有关全国性学会（协会）、上海及各地工厂企业、研究所、大专院校、人民邮电出版社等 50 多个单位 200 多位同志的大力支持、指导和帮助，在此一并表示衷心的感谢。

由于时间紧迫，工作量很大，组织编写、摄制系统性的可靠性教材及电视教学片尚属首次，缺乏经验，不妥之处，敬请读者批评指正。

可靠性工程与管理电视讲座和函授班教育委员会

1992 年 9 月

编 者 的 话

本书是《可靠性工程与管理》电视讲座和函授班教材之五。主要是为从事电子产品设计人员进行可靠性设计方面的在职教育和岗位培训之用。

可靠性设计是可靠性工程的主要内容。产品的可靠性主要是由设计所决定，所以可靠性工作必须从设计抓起，设计人员必须补上可靠性设计这一课。

根据《可靠性工程与管理》电视讲座和函授班教育委员会的教学方针，本书以民用电子产品为重点，兼顾工业和国防电子设备与系统，贯彻理论联系实际，学以致用方针。全书着重讲授可靠性设计技术的应用，扼要讲授可靠性设计的理论知识。使读者通过对本书的学习，能基本掌握可靠性设计的一般方法。本书吸收了目前国内外出版的有关可靠性书刊文献、培训班讲义和可靠性标准中的部分内容，也有相当部分是作者多年来从事可靠性工程的现场实践、应用实例和可靠性教学工作的总结。

本书经倪正铭、周元初两位同志审核，并提出了许多宝贵的意见，最后经教研组长、教材主编傅光民同志审定，特此表示衷心感谢。

由于可靠性设计技术正处在发展之中，加之作者水平的限制，成书时间的仓促，谬误之处在所难免，祈请广大读者给予批评指正。

作 者

1988年2月于上海

目 录

第一章	绪论	1
第二章	机械产品可靠性设计的内容、方法和步骤	6
第三章	确定工作应力分布和强度分布的方法	17
第四章	应力-强度分布干涉理论和机械零件的可靠度计算	36
第五章	可靠度的置信区间	50
第六章	机械零件可靠性设计的数据及获得方法	60
第七章	机械系统的可靠性	74
第八章	维修性设计	82
第九章	可靠性试验	96
第十章	FMECA和FTA在机械可靠性中的应用	114
第十一章	机械可靠性设计与分析实例	124

第一章 绪 论

1.1 为什么要研究和重视机械可靠性

① 随着现代科学技术的发展,机械产品(包括机电一体化产品)的结构日益复杂化,性能参数越来越高,工作环境条件更加严酷,因此,对产品本身的可靠性要求越来越高。

② 可靠性涉及巨大的经济效益,并且是国际贸易竞争的需要。国际市场上机械产品的价格与其可靠性水平的高低有关。许多产品在投标、签订合同和鉴定、验收时都采用了可靠性指标。

③ 可靠性影响到国家的安全和声誉。例如1986年4月苏联切尔诺贝里核电站爆炸事故,对国家的安全和声誉造成了严重损害。

④ 可靠性是国防、军工生产的需要。

鉴于上述原因,原国家机械工业委员会发出了《关于加强机械产品可靠性工作的通知》(1986年11月25日),其中指出:“各级机械工业管理部门和企业,都必须把提高产品可靠性工作当做一件大事来抓”。“要求达到的预期目标是:在七五计划期间,要求考核1000种机电产品具有相当于国际上同类产品70年代末水平的可靠性指标。”

1.2 机械可靠性的定义和特征量

1.2.1 机械可靠性的定义和要点

通常采用的可靠性定义是:产品在规定条件下和规定时间内完成规定功能的能力。如果用“概率”来量度这一“能力”,就是可靠度,用 $R(t)$ 表示。这一定义也适用于机械产品。

可靠性定义的要点如下:

① 产品。产品包括零件、部件、装置、设备和系统。操作人员也被看作是系统的组成部分。还应注意,“产品”这一概念还在不断扩大,计算机软件也可看作是产品。

② 规定条件。主要指工作环境条件,如压力、温度、湿度、盐雾、腐蚀、辐射、冲击、振动、噪声等。还包括使用和维修条件、动力和载荷条件、操作工人的技术水平等。

③ 规定时间。可靠度是时间性的质量指标,时间可能是指区间 $(0, t)$,也可能是指区间 (t_1, t_2) 。时间一般是以小时、年为单位,但根据产品的不同,广义的时间包括车辆行驶的里程数、回转零件的转数、工作循环次数、机械装置(起重机、机械手、柱塞泵等)的动作次数等。

④ 规定功能。功能通常是指产品的工作性能或能力。可靠性标准(GB3187-82)规定:“失效即产品丧失了规定的功能。对可修复产品通常也称为故障”。

功能有主次之分,故障也有主次之分。次要的故障不影响主要功能,因而也不影响可靠

性。但有时动作不稳或性能下降也构成故障，所以是不能允许的。

失效的分类方法有许多种，通常，完全不能工作的失效有两种：①突变失效，这是一种事先不能预测的失效。②渐变失效，这是一种因功能逐渐衰退而产生的失效，一旦产生便很难修复。

⑤ 概率。概率是可以量度的，其值在零到1之间，所以 $0 \leq R(t) \leq 1$ 。产品从零开始工作了 t_1 小时之后的可靠度为 $R(t=t_1 \text{ 小时})$ ；产品从 t_1 开始工作了 t_2 小时之后的可靠度为 $R(t_1, t_2 \text{ 小时})$ ，显然， $R(t_1, t_2)$ 为条件可靠度。可靠度是在一定置信度下的条件概率。置信度是指所求得的可靠度在多大程度上是可信的。

1.2.2 机械可靠性的指标（特征量）

1. 可靠度 $R(t)$

$$\hat{R}(t) = 1 - \frac{N_f(t)}{N_r} = \frac{N_s(t)}{N_r} \quad (1-1)$$

式中， $\hat{R}(t)$ ——与时间 t 相应的可靠度估计值，

$N_f(t)$ ——产品工作到 t 时刻的失效数，

N_r ——产品数（通常， $N_r = \text{样本量 } n$ ），

$N_s(t)$ ——产品工作到 t 时刻的存活数。

$\hat{R}(t)$ 是根据样本得出的可靠度估计值，其置信度 = 50%。当 $N_r \rightarrow \infty$ 时， $\hat{R}(t) \rightarrow R(t)$ 。

$R(t)$ 是根据总体得出的可靠度真值，也叫理论值，其置信度为 100%。通常研究的对象都是样本，为了方便，省略了估计值的符号“ $\hat{\cdot}$ ”。

可靠度是产品不失效的概率。不可靠度是产品失效的概率。产品失效和不失效是互逆事件，因此

$$R(t) = 1 - Q(t) = 1 - P_f \quad (1-2)$$

式中， $Q(t)$ ——不可靠度，

P_f ——失效概率。

2. 失效率 $\lambda(t)$

失效率是“工作到某时刻尚未失效的产品，在该时刻后单位时间内发生失效的概率”。

其观测值为“在某时刻后单位时间内失效的产品数与工作到该时刻尚未失效的产品数之比”。

应当注意，只有在产品寿命服从指数分布时，使用失效率这一指标才有意义。然而，大多数机械产品的寿命并不服从指数分布，而是随着时间的增加而增大，如图 1-1 所示。

常用的失效率单位是 10^{-6} 次/小时（或次/ 10^6 小时）。对于可靠度很高、失效率很小的零（元）件，采用菲特（Fit，是 Failure Unit 的缩写）作为单位，1 菲特 = 10^{-9} 次/小时。

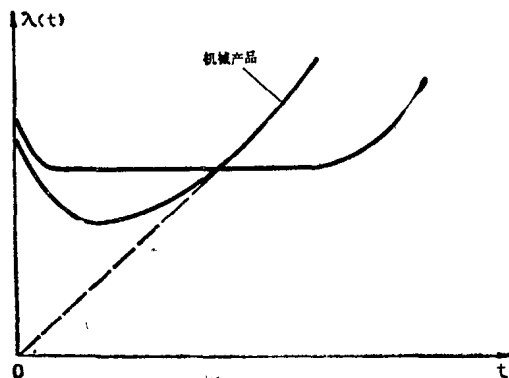


图 1-1

3. 平均寿命

平均寿命的表示方法,对于可以修复的产品,采用平均无故障工作时间 ($MTBF$); 对于不可修复的产品,采用平均失效时间 ($MTTF$)。

有时用户更加关心的是平均首次故障时间 ($MTTFF$)。

4. 维修度 $M(t)$

5. 修复率 $\mu(t)$

6. 平均修复时间 ($MTTR$)

7. 有效度 (可用率) $A(t)$

有效性的特征量有瞬时有效度、平均有效度和稳态有效度。瞬时有效度 $A(t)$ 是“产品在某一时刻具有或保持其功能的概率”。平均有效度是“在某个规定时间区间内有效度的平均值”。当时间趋于无限时,瞬时有效度的极限值为稳态有效度,表示为 $A(t) = A$ 。

有效度的观察值为在某个时期内,产品能工作的时间 U 对能工作时间 $\bar{U}$ 与不能工作时间 D 之和的比,表示为

$$A(t) = \frac{U}{U + D} \quad (1-3)$$

产品不能工作时间 D 包含了许多内容。如果只考虑修复时间,则有效度可表示为

$$A(t) = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (1-4)$$

8. 可靠寿命 t_R

即与规定的可靠度相对应的时间。

9. 平均大修间隔

10. 强迫停机率 (*Forced Outage Rate*)

$$FOR = \frac{\text{停机时间}}{\text{运行时间} + \text{停机时间}} \quad (1-5)$$

11. 重要度 I

$$I = \frac{\text{某一设备故障引起的系统故障次数}}{\text{系统中所有设备发生故障的次数}} \quad (1-6)$$

12. 经济尺度

$$\textcircled{1} \quad \text{费用比 } CR = \frac{(\text{年}) \text{ 维修费}}{\text{购置费}}$$

$$\textcircled{2} \quad \frac{\text{维修费} + \text{操作费}}{\text{动作时间}}$$

$$\textcircled{3} \quad \frac{MTBF}{\text{成本}}$$

$$\textcircled{4} \quad \text{寿命期总费用 (LCC)}$$

1.3 影响机械可靠性的因素

可靠性工程的一般原理对于机、电两大类产品都是适用的,但是同一种可靠性因素对两

者的影响可能不同，如表 1—1 所示。

表 1—1

序号	可靠性因素	电 子 设 备	机 械 设 备
1	应用系统施加的载荷	载荷通常是既严格又受到控制(除短路外)。通常，保护是容易的	载荷很少能得到控制，防止过载的保护比较困难
2	由环境引起的载荷的变化	通常是由于温度、压力和湿度变化等而引起的	风、雪、冰雹等影响到露天设备。压力变化影响到发动机等装置。土壤的干湿程度影响挖掘和运输设备。振动影响应力水平
3	产品的固有 能力	固有可靠性是下列因素的函数：①产品的复杂性；②产品革新的程度；③设计和生产的竞争能力；④质量管理的效果	
		①通常更复杂，并含有更高级的革新技术；②元件的过载能力较小；③根据许多产品的使用经验，建立元件可靠性数据库通常是可能的；④通常大多数元件的可达性较好，而且备件的成本较低	①较不复杂，只含有较低级的革新技术；②元件的过载能力为中等；③可靠性数据能从一种产品转移到另一种产品的程度是有限的；④机械设备中的可达性常常较差，而且备件的成本往往很大
4	由环境引起的 能力的变化	①对潮湿很敏感，但由于保护技术的发展，目前只有很少是由潮湿引起失效；②大多数设计成在给定温度范围内工作，在此范围之外，能力将降低，如果受高温，可能会由于材料变形或衰变而导致永久损坏。低温多半不会引起永久损坏；③在振动下可能引起连接部分的断裂；④除开关外，对于灰尘和其他碎屑的累积并不特别敏感	①潮湿影响表面粗糙度，而且在运动零件的表面通常不能涂保护层和要求密封；②通常对温度变化较不敏感，例外的情况是内燃机和有精密公差的零件；③许多机械设备受到严重的振动，主要危险是零件的疲劳。在载荷没有得到控制和有大的振动的地方，可靠度是低的；④某些机械设备对于灰尘和碎屑是敏感的，它们堵塞了零件间隙，并引起了运动零件的磨损
		两者可能必须经得起闲置期，这是一种特殊的环境条件，其影响必须加以考虑	
5	由磨损引起的 能力的变化	磨损的主要影响是开关的接触	通常，这是影响可靠性的一个关键因素
6	筛 选	可将早期失效的产品剔除，从而提高可靠性	效果不如电子设备那样显著
7	装 配	通常对设备的可靠性影响较小	影响较大，常会出现可靠的零件装配成不可靠的产品

1.4 机械可靠性工程师的职责

机电工业企业中的可靠性工程部门的基本功能和职责是：

- ① 通过设计把可靠性设计到产品中去；
- ② 以合适的制造工艺来保证可靠性；
- ③ 以完善的质量管理与检验来保证可靠性；
- ④ 以周密设计的可靠性试验来验证和评定可靠性；
- ⑤ 以适当的包装和运输作业来保持可靠性；
- ⑥ 通过优良的现场服务、使用和维修手册来保证使用可靠性；
- ⑦ 在整个可靠性设计中，通过可靠性数据和信息反馈，来改进产品的可靠性。

这些功能和职责的要点是：

- ① 规定可靠性和维修性指标，使设计到产品中的可靠性和维修性指标达到最优；
- ② 在设计阶段预测产品的可靠性和维修性；
- ③ 进行失效模式、影响及致命度分析 (FMECA)；
- ④ 进行失效树分析 (FTA)；

- ⑤ 决定备件要求;
- ⑥ 确定能够导致高可靠性和低维修时间的零件、材料和工艺过程;
- ⑦ 进行设计评审 (*DR*), 找出设计缺陷, 并提出改进的建议;
- ⑧ 拟定可靠性试验方案;
- ⑨ 建立失效数据反馈、分析和事后措施系统;
- ⑩ 分析失效和性能数据, 确定失效率、平均无故障工作时间 (*MTBF*) 和可靠度;
- ⑪ 确定设计、材料和工艺过程需要做哪些修改, 需要采取哪些改进措施, 以达到可靠性和维修性目标;

⑫ 确定整个产品或系统的有效性。

据估计, 目前美国可靠性工程师的人数占工程师总人数的 6% 左右。据美国质量管理学会 (ASQC) 的介绍, 可靠性工程师的主要职责是:

- ① 在设计新产品时, 帮助设计工程师选择材料、零件和最优的制造工艺, 并考虑环境 (如低温、振动、盐雾等) 对产品的影响;
- ② 制订可靠性试验方案, 对产品进行试验, 以评定其可靠性指标, 和确定其工作寿命, 熟悉和经常采用加速寿命试验方法;
- ③ 研究产品在不同使用条件下满意地工作的概率;
- ④ 开发可靠性信息, 建立保用期制度, 提出适当的操作及服务方法;
- ⑤ 研究并确定产品失效的原因, 提出防止其再发生的纠正方法和措施;
- ⑥ 保证新的设计没有易于引起失效的缺陷;
- ⑦ 用计算机模拟产品的使用, 例如, 用计算机模拟昂贵的火箭或其他复杂产品的工作寿命。

第二章 机械产品可靠性设计的内容、方法和步骤

2.1 可靠性设计在整个可靠性计划中的地位

从产品的生产计划开始,经过构思、设计、研制、制造、装配、试验、使用、维修、故障反馈,一直到报废,所有阶段都应当有可靠性保证措施。其中,设计正确,确保设计阶段的可靠性是最重要的一环。因为生产是按照设计进行的,设计决定了产品的固有可靠性。

发达国家大都制订了关于可靠性计划和管理方面的标准,比较著名的是美国军用标准 *MIL-STD-785B*《系统及设备研制与生产的可靠性计划》(1980年)和英国标准 *BS 5760*《系统、设备和零件的可靠性》第一部分《可靠性计划管理指南》(1979年)。现对 *BS 5760* 第一部分的可靠性计划说明如下。

1. 可靠性技术要求

在设计之初,应当有详细的可靠性技术要求,它把可靠性和维修要求具体化,并且说明操作、维修和环境对可靠性的影响。通常是由用户提出技术要求,如果用户没有明确的要求,那么可靠性工程师应当能够自己确定产品的可靠性目标。根据技术要求,在设计阶段要弄清潜在的可靠性缺陷、薄弱环节及其产生的原因,并尽可能在设计阶段及时修改设计。

可靠性技术要求中应当包括可靠性指标及定义中的几个要点,主要有下列内容:

① 可靠性指标。应明确地规定出指标的目标值,而且可以预测和量度。如果指标是可靠度,应标明规定的时间。

② 失效定义。必须明确失效的定义和失效模式。

③ 维修性指标。在规定可靠性指标时,维修性是一个重要因素。良好的维修性可以提高零件和设备的可靠性,例如通过预防维修,适时地更换那些性能逐渐衰退的零件,可以避免由于磨损、变形、疲劳、腐蚀等原因而引起的失效。维修性也有许多指标,经常采用的是平均修复时间 (*MTTR*) 和最大维修时间 t_{Mmax} 。

④ 载荷情况。需要对载荷谱等加以说明,因为载荷的变化较之于强度的变化对失效有更大的影响。

⑤ 环境条件。在正常工作情况下,环境的影响对于应力水平的影响很大,因而是影响失效的重要原因之一。所以,应当有对环境条件的要求及限制。

⑥ 可靠性保证。对于机械产品进行可靠性试验常常是不可能的,因为可靠性试验既费时又费钱。因此,试验不能作为唯一的保险手段。为了保证设计能达到可靠性目标,技术要求应当说明包括哪些关键性的措施(如设计评审、*FMECA*、*FTA*等)和预测;应当如何记录;应当使用什么数据及来源,以及应当采取什么样的设计观点,等等。

2. 冗余分析

冗余也称为贮备,是提高系统或设备可靠性的主要方法之一。在进行设计方案审查时,需要进行冗余分析。冗余在系统设计中比在设备设计中更有用。

在系统中采用冗余的必要性是十分明显的。重要的系统必须有冗余,即在系统中增加一些冗余部件(或子系统),以求当系统的某一零部件发生故障时,整个系统仍能正常工作。例如汽车的制动系统。

冗余设计的内容是:在体积、重量、成本和能耗等约束条件下,确定最优的冗余方式和预测冗余系统的可靠性。

冗余有多种方式,常用的有:①并联冗余。例如泵或阀门的并联使用等;②表决冗余(即 k/n 系统),例如飞机的发动机系统,有4台发动机的飞机,只要其中2台能够正常工作即可保证正常飞行,称为2/4系统,因此装4台发动机比装2台发动机有更高的可靠性;③旁联(待机)冗余。冗余部分平时并不参加工作,而是处于等待状态,一旦工作的部件发生故障,它能立即开始工作;④载荷均分并联冗余。在这种冗余系统中并联的子系统平均地分担着载荷,当一个子系统失效时,幸存的子系统便承担增大了的载荷。

必须注意,为了提高系统的可靠性,应首先考虑采取下列方法:①简化设计;②采用高可靠性的零部件;③降额使用,就是说,使产品工作时的功率、速度等低于额定值。

3. 维修性分析

包括确定修复时间分布、预测维修度、备件数、维修策略、最佳维修周期,以及维修人员的规模和技术水平等。

4. 设计评审

设计评审是可靠性计划中的一项基本活动,主要目的是从可靠性、维修性和安全性的要求出发,对于产品设计进行全面而深入的审查和分析,及早地查出设计中的缺陷并加以补救,以保证产品在使用时能达到可靠性和维修性目标。

通常,从设计到使用,要使机械产品的可靠性达到满意的程度,可能要花几年甚至更多的时间,而且,预定的可靠性目标不一定能实现。这时,设计人员应注意及时修改设计,否则会使成本提高或延误时间。经验表明,设计更改得越早,则损失越小。一般来说,在试验和生产之前更改设计的花费,比生产时再更改设计要便宜几十倍甚至更多。

2.2 机械可靠性设计的特点

① 可靠性设计要求根据不同的产品、使用场合而采用不同的可靠性指标,如可靠度、失效率、 $MTBF$ 、维修度、 $MTTR$ 、可靠寿命、有效度、经济尺度等。在设计之初,最重要的就是确定可靠性指标及其量值,并考虑如何去评价它。

② 可靠性设计强调要在设计阶段“把可靠性直接设计到零件中去,再进而设计到系统中去”。这个可靠性被称为固有可靠性。它是由设计决定的,而由制造和管理来保证。

③ 可靠性设计必须考虑环境的影响。环境对应力有很大影响,从而影响了可靠度的大小。例如高温、低温、冲击、振动、潮湿、盐雾等环境条件,都是可靠性降低的主要原因之

一。在严酷条件下工作的机械设备，会比在正常条件下工作的机械设备更早地失效。

④ 对维修性的考虑。当有效度是主要的可靠性指标时，不论产品的质量有多高，都必须考虑维修性，否则不可能维持高有效度。

⑤ 可靠性设计承认在设计阶段及其以后的阶段都需要可靠性增长。GB3187—82 关于可靠性增长的定义是：“随着产品设计、研制、生产各阶段工作的逐步进行，产品的可靠性特征量逐步提高的过程”因此，在不同的阶段，系统的可靠性预测要反复进行几次。

此外，在进行可靠性设计时必须从整体的、系统的观点去考虑问题，不应“头痛医头，脚痛医脚”；要从人机工程的观点去考虑问题；需要考虑产品的寿命期总费用（LCC），而不是只考虑购置费用，等等。

还应指出，尽管可靠性设计是一种新的设计理论和方法，它仍然需要传统的设计经验，并且与其它设计方法和理论一起综合应用，例如有限元分析、断裂力学、疲劳统计学、实验应力分析等。

2.3 机械可靠性设计的内容

1. 确定可靠性指标及其量值

采用什么可靠性指标，取决于产品的设计要求，而可靠性指标的大小则取决于产品的重要性。这里，要重视过去的经验、用户的要求及市场调查。例如对于汽车，可以采用可靠度、有效度、MTBF 或里程数作为可靠性指标，如表 2—1 所示。

表 2—1

等 级	零部件名称	可靠寿命的目标值 (公里)	试车场上的可靠寿命 (公里)
A	底 盘	12×10^4	9.5×10^4
B	传动系统	8.5×10^4	10.5×10^4
E	电气系统	5×10^4	10×10^4
F	悬挂件	3×10^4	3.8×10^4

注：A、B 级可靠寿命的置信度为 95%，E、F 级的置信度为 80%。

2. 对可靠性指标进行合理的分配

例如，根据用户要求和市场调查，要求小汽车可靠度为（ $t = 1$ 年）0.9967。这意味着，在一年的使用期内，每 10000 辆汽车中平均只有 33 辆失效。现在把这一目标值分配到各个子系统，如表 2—2 所示。

表 2—2

子系统序号	子系统	分配的可靠度	能达到的可靠度	设计改进后可靠度 预测值	样机可靠度的观 测值
1	发动机	0.99775	0.99750	0.99885	0.99845
2	变速箱	0.99935	0.99910	0.99940	0.99930
3	传动系统、底盘 与悬挂件	0.99970	0.99935	0.99945	0.99969
4	电气系统	0.99992	0.99825	0.99995	0.99985
整车可靠度		0.9967	0.9942	0.9977	0.9972