

数控机床性能分析 及可靠性设计技术

孙志礼 张义民○等编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



数控机床性能分析及 可靠性设计技术

孙志礼 张义民 何雪涪 尚建忠 修世超 编著
闫玉涛 王 丹 杨 强 王 卓



机械工业出版社

序

可靠性是产品重要的质量特性之一，它反映了产品在使用过程中性能、精度等的保持性和稳定性，只有高可靠性的产品才能在国际市场的激烈竞争中占得一席之地。

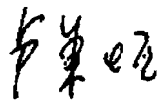
可靠性学科从诞生至今已有五十多年的历史，可靠性技术已成功应用于航空、航天、核能、电子等多个领域，解决了用常规技术无法解决和无法解释的问题。在民用产品中，日本是应用可靠性技术最好的国家之一，其产品的可靠性水平得到了世界各国的公认。我国虽然在1988年由原机械电子工业部组织开展了民用产品的可靠性工作，但那时只是对很多产品的可靠性水平进行了摸底，没有在企业真正展开。

目前，我国各大行业正在实施战略振兴计划，以提高产品的国产化水平。高档数控机床与基础装备制造作为其中之一，正在开展全方位的攻关，解决新产品的研发、制造和主要功能部件的国产化问题。

就数控机床生产领域而言，目前我国国产数控机床的故障率仍然较高，可靠性问题存在于各个方面，包括设计、制造、装配、材料、国产元器件的质量、用户使用操作不当等。同时，目前各主要生产厂家的产品中，主要功能部件依赖于国外进口，没有完全实现国产化设计生产。因此，要解决产品的可靠性问题需要全面提高产品的设计、制造能力，系统实施可靠性管理工程。这其中，可靠性设计能力的提高是实现国产化的重要途径。

可靠性是产品在规定的条件下，规定的时间区间内，完成规定功能的能力。可靠性设计就是要利用可靠性理论和方法解决产品在设计使用中的随机性问题。可靠性设计与性能试验技术作为国家机床重大专项中的共性技术，可为制造企业和用户提供保证和提高产品可靠性的专有技术和方法。

该书是五轴联动加工中心可靠性设计与性能试验技术课题组经过两年的研究，将所取得的研究成果汇聚而成，从数控机床的可靠性设计、可靠性试验到使用中可靠性的保持，比较全面地介绍了开展可靠性工作的内容和方法，希望能在提高国产化的数控机床可靠性方面起到积极的促进作用。



2011.4.29

前 言

本专著是由国家“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项课题“五轴联动加工中心可靠性设计与性能试验技术(2009ZX04014-014)”资助,经过课题组成员近两年的研究编写而成。

为了提高国产数控机床的可靠性水平以及提升国产化的水平,课题组重点从可靠性设计分析、可靠性试验技术等方面展开了大量的研究工作。其研究的基本理论方法、研究思路以及所设计的可靠性试验规范等对同类产品或相关产品的可靠性研究具有一定的指导和借鉴价值。因此,课题组成员将研究中涉及的一些基础知识和基本方法加以总结概括,构成本书的主要内容。

本书介绍了数控机床可靠性设计的基础知识;适用于数控机床复杂产品的故障模式、影响及危害度分析(FMECA)方法;参数化的建模及可靠性仿真分析方法,包括整机和主要功能部件,为提高国产化的数控机床可靠性设计与分析水平提供技术和方法;主要功能部件及关键零件的性能及可靠性分析方法;机构运动精度的可靠性分析方法;考虑主要影响因素——磨损的数控机床性能退化可靠性模型;加工中心整机和电主轴以及数控装置的可靠性试验规范和小子样、异总体、多阶段的Bayes可靠性评价方法,为复杂产品的可靠性评估提供了一种实用和有效的方法。

本书共分8章:绪论,可靠性设计基础,数控机床的故障模式、影响及危害度分析(FMECA),数控机床功能部件的参数化建模及可靠性仿真分析,功能部件性能及可靠性分析,数控机床机构运动精度的可靠性分析,基于磨损的性能退化模型和精度保持措施,数控机床可靠性试验方法。

参加本书编写工作的人员:孙志礼、张义民、何雪泓、尚建忠、修世超、闫玉涛、王丹、杨强、王卓。另外,感谢参加课题工作的研究生在本书编写过程中所做的工作。

由于时间仓促,编者的水平有限,书中会有一些不妥之处,希望读者批评指正。如果本书能为提高我国国产化数控机床的可靠性设计水平发挥作用,作者会聊以欣慰。

作 者

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究可靠性的重要意义	1
1.2 机械可靠性学科发展回顾	2
1.3 数控机床的发展历史和现状	3
1.4 数控机床可靠性研究发展现状	4
1.5 可靠性学科研究的范畴	5
第 2 章 可靠性设计基础	7
2.1 概述	7
2.2 可靠性定义及方法	7
2.3 可靠性中常用的概率分布	11
2.4 可靠性特征量	19
2.5 机械可靠性设计分析方法	28
2.6 基于响应面方法的可靠性灵敏度分析	30
第 3 章 数控机床的故障模式、影响及危害度分析 (FMECA)	33
3.1 概述	33
3.2 加工中心 FMECA 分析	34
3.3 专家系统	47
第 4 章 数控机床功能部件的参数化建模及可靠性仿真分析	57
4.1 参数化模型建立的必要性及常用参数化建模软件简介	57
4.2 电主轴参数化建模	64
4.3 工作台的参数化建模	75
4.4 直线滚动导轨参数化建模	95
4.5 滚珠丝杠的参数化建模	103
4.6 高速电主轴可靠性仿真	120
第 5 章 功能部件性能及可靠性分析	136
5.1 加工中心工具系统及切削过程工作可靠性	136
5.2 滚珠丝杠的变形分析及热分析	157
5.3 齿轮振动可靠性与修形减振策略	174
5.4 滚动轴承的可靠性仿真分析	189
第 6 章 数控机床机构运动精度的可靠性分析	207

6.1 概述	207
6.2 数控机床机构运动学分析	214
6.3 数控机床机构误差建模技术	222
6.4 数控机床运动精度可靠性分析	237
第7章 基于磨损的性能退化模型和精度保持措施	253
7.1 随机过程	253
7.2 性能退化	254
7.3 磨损随机过程分析及可靠性预测	263
7.4 磨损随机可靠性预测算例	287
7.5 数控机床的精度保持措施	294
第8章 数控机床可靠性试验方法	309
8.1 概述	309
8.2 加工中心电主轴可靠性试验规范	309
8.3 加工中心数控装置可靠性试验规范	315
8.4 加工中心可靠性试验规范	327
8.5 可靠性评估及应用	336
参考文献	351

第 1 章 绪 论

1.1 研究可靠性的重要意义

随着科学技术的发展,产品质量的含义也在不断地扩充。以前产品的质量主要指产品的性能,即产品出厂时的质量,而现在产品的质量已不局限于产品性能这唯一的指标。目前,产品质量的定义是:满足使用要求所具备的特性,即适用性。这表明产品的质量首先是指产品的某种特性,这种特性反映着用户的需求。概括起来产品质量特性包括:性能、可靠性、经济性和安全性四个方面。性能是产品的技术指标,是出厂时($t=0$)产品应具有的质量特性,显然,能出厂的产品就应满足性能指标;可靠性是产品出厂后($t>0$)所表现出来的一种质量特性,是产品性能的延伸和扩展;经济性是在确定的性能和可靠性水平下的总成本,包括购置成本和使用成本两部分;安全性则是产品在流通和使用过程中保证安全的程度。

在上述产品质量特性所包含的四个方面中,可靠性占主导地位。性能差,产品实际上是废品;性能好,也并不能保证产品的可靠性水平高。反之,可靠性水平高的产品在使用中不但能保证其性能的实现,而且故障发生的次数少、维修费用及因故障造成的损失也少、安全性也提高了。由此可见,产品的可靠性是产品质量的核心,是生产厂家和用户努力追求的目标。

我国已加入 WTO 组织,在经济上与国际接轨。因此,我国的企业参与国际市场的竞争,进入国际经济的大循环圈,是经济发展的必然。用户不仅要求产品性能好,更重要的是要求产品的可靠性水平高,这是产品占领市场的关键。美国人曾预言:今后只有那些具有高可靠性指标的产品及其企业,才能在日益激烈的国际贸易竞争中生存下来。而日本人则断言:今后产品竞争的焦点是可靠性。因此,产品的质量尤其是产品的动态质量(可靠性)就显得尤为重要。

另外,研究产品可靠性的意义还在于产品责任法的建立。在美国等技术发达国家的 product liability 法中规定:只要是因产品缺陷、故障对用户造成的损失,制造者要承担法律和经济责任。据 1975 年美国《质量进展》杂志预测,由于产品责任问题,当年请求赔偿金额达 500 亿美元。在产品责任法中同时还规定:如果制造者能出示证明进行了可靠性设计和可靠性保证等活动的资料,可以排除责任。从这点也可看出研究产品可靠性的重要意义。

1.2 机械可靠性学科发展回顾

可靠性学科从诞生至今已有五十多年的历史。形成这门学科的起源就是用传统的质量分析方法无法解释实际中出现的失效问题。在第二次世界大战期间,美国空军由于飞行故障而损失的飞机为 21 000 架,比被击落的多 1.5 倍;运往远东的作战飞机上的电子设备 60% 在运输中失效,在储存期间有 50% 发生失效;海军舰艇上的电子设备 70% 因“意外”事故而失效。这些事实引起美国军方的高度重视,开始研究这些“意外”事故发生的规律,提出了可靠性的概念。

1952 年,美国军事部门、工业部门和有关学术部门联合成立了电子设备可靠性咨询组(简称 AGREE)。在 1957 年,AGREE 发表了著名的“军用电子设备的可靠性”报告,提出了在研制及生产过程中对产品的可靠性指标进行试验、验证和鉴定的方法,提出了电子产品在生产、包装、储存和运输等方面要注意的问题及要求等。这个报告被公认为是电子产品可靠性理论和方法的奠基性文件。从此,可靠性学科才逐渐发展成为一门独立的学科。

机械可靠性是可靠性学科的一个重要组成部分。对结构可靠性设计理论和方法的研究可以追溯到 20 世纪 40 年代。A. M. Freudenthal 教授是早期从事结构可靠性研究的代表人物之一,1947 年他提出了用于构件静强度可靠性设计的应力-强度干涉模型,利用该模型可以进行构件的可靠性设计。由于影响机械设备和系统可靠性的因素众多,难以控制,而且单批产品的数量较少,试验费用较大,所以机械可靠性设计在 20 世纪 50~60 年代没能全面展开。尽管如此,从事可靠性研究的学者还是做了大量的工作,给出了常用应力、强度分布的各种组合下可靠性的计算公式,并对一些难于解析的可靠度计算公式给出了数表供设计时使用。E. B. Haugen 创造了统计代数运算,为可靠性设计的应用奠定了理论基础。

正如 E. J. Henley、H. Kumamoto 指出的那样,在 20 世纪 70 年代,除了计算机和环境科学之外,可靠性、安全性和风险估计是发展较快的应用科学之一。

美国 20 世纪 70 年代将可靠性技术引入汽车、发电设备、拖拉机和发电机等机械产品中。20 世纪 80 年代,美国罗姆航空研究中心专门作了一次非电子设备可靠性应用情况的调查分析,指出了非电子设备的可靠性设计非常困难。之后,美国国防部可靠性分析中心(RAC)收集和出版了非电子零部件的可靠性数据手册。

日本以民用产品为主,大力推进机械可靠性的应用研究。在日本科技联盟中设有一个机械工业的可靠性分科会,由企业的可靠性推进人员和院校教授组成。日本可靠性的研究主要强调实用,这就大大地促进了日本的机电产品可靠性水平的提高。

前苏联对机械可靠性的研究十分重视,在其二十年的科技规划中,将提高机械

产品的可靠性和寿命作为重点任务之一。前苏联制定了很多以机械产品为主的国家标准,用以推进可靠性技术的应用。

20 世纪 80 年代,我国开始重视机械可靠性的研究。从 1986 年起,原机电部已经发布了六批限期考核的机电产品可靠性指标的清单,前后共有 879 种产品已经进行了可靠性指标的考核。

1.3 数控机床的发展历史和现状

1952 年美国研制出了世界第一台数控机床(铣床),并在芝加哥机床博览会上展出。1958 年日本与中国同年开发出了第一台数控机床。但由于当时微电子技术、计算机技术尚不发达,数控机床历经了电子管、晶体管阶段,发展甚为缓慢。1965 年集成电路问世,数控机床开始新的发展阶段。1979 年出现了超大规模集成电路,数控机床获得了较为迅速的发展。随着各种高效自动机床、自动化技术的发展,先进的技术和广阔的应用天地给数控机床发展提供了舞台和市场。世界工业发达国家切割机床产品数控化普及率超过 50%。20 世纪 70 年代以来,数控装置的技术不断进步,特别是 32 位微处理器、数字伺服、人工智能和网络通信接口的应用,促进数控机床向高速化、高精度化、复合化、智能化和系统化方向发展。20 世纪 80 年代,数控机床关键元件的变化也为数控机床的发展创造了条件。由于微电子技术的进步,在提高集成度的同时,芯片价格不断下降,加上机电一体化技术简化了数控机床的机械结构,从而使数控机床的性价比有明显提高。当今数控机床数量的多寡已成为衡量各国机床工业乃至制造技术水平高低的重要指标。

中国第一台数控机床是由清华大学和北京第一机床厂于 1958 年研制成功的,但后来发展甚为缓慢,直至 1978 年中国政府开始重视并支持以后才得到较快发展。1980 年以来,中国机床行业有 30 多家企业先后从日、美、德等国引进了 40 多项与数控机床的生产和发展有关的技术,经过消化、吸收和二次开发,可生产多种中等规格、普通精度、中高档水平的数控机床。1986~1990 年是中国数控机床飞速发展的时期。在此期间,国家安排了重点科技攻关项目“柔性制造系统(FMS)技术及设备开发技术”和重点科技开发项目“数控机床引进技术消化吸收(数控机床一条龙)”。通过这两个项目的实施,推动了中国数控机床的发展。到 1995 年中国数控机床在技术和生产上均有很大发展。FANUC3 系统及 6 系统、GEMC—1 系统的国产化率达到了 80% 以上。在开发这些系统的基础上扩展功能,派生出了 20 多类品种,并在高档数控系统方面有了一些突破,如多轴联动的数控系统(6 轴 5 联动数控系统等),数字仿形数控系统,柔性制造单元用数控系统等,均能提供产品。同时自行开发的 STD 总线模块化的 8 类低档全功能数控系统已经批量供货。产品的覆盖面有车床、加工中心、仿形铣床、齿轮加工机床、折弯机、火焰切割机及柔性

制造单元等。通过近 20 年的努力,中国数控机床设备生产方面已形成了较大的生产规模,其中,中档数控机床年生产能力为 600 套,经济型数控机床年产 3500 台左右。

1.4 数控机床可靠性研究发展现状

在科技日新月异的今天,可靠性工程正变得日益重要,可靠性已变成衡量一个系统性能好坏的重要指标之一。一个系统只有在长期稳定可靠地工作前提下才能发挥其各种功能,系统中各装置、模块之间必须严格控制协调一致地工作。对于高度复杂和高度自动化的数控机床来说,人们对其依赖性越来越大,其不可靠和不安全因素会造成自身严重损坏,甚至伤及人的生命,给国家和企业造成重大的损失。

近些年,我国数控技术取得突飞猛进的发展,使我国的制造业也取得了长足进步,但与国外的同级产品相比,无论是在设计水平,还是在实际使用过程中,表现并不如意。其原因主要表现在以下几个方面:

1) 机械传动结构及功能部件的设计可靠性有待提高,数控机床的机械传动结构及功能部件的设计可靠性在很大程度上也决定了整机的可靠性。我国历来只重视主机的设计和制造,造成数控机床的功能部件(如滚珠丝杆、滚动导轨、数控车床转塔刀架、加工中心刀库和机械手)质量差、可靠性低。为此,机床选用高性能、高可靠性的数控系统、伺服驱动装置配套功能部件、电器元件、检测元件以保证机床可靠性。此外,还要大力发展刀具产业,开展新颖刀具材料的研究,设计新颖的数控机床刀具,提高刀具寿命,延长数控机床的精度保持时间,从而提高机床的可靠性。

2) 机床可靠性试验工艺不规范。机床部件可靠性无相应的试验标准,评价体系不完整。由于不同的评价标准,导致机床可靠性水平评价不一致。

3) 机床数控系统故障较多。国产机电元器件(附件)质量较差,我国的低压电器、机电元器件粗制滥造,任意销售,相互仿造,真假难分;电源及工艺技术水平低,据国外统计,计算机的故障 90% 来自电源对干扰的传导和电源自身故障,往往强电设备对电源系统有“污染”,它产生很强的脉冲噪声,通过传导影响电子设备的安全运行。

4) 伺服系统的设计可靠性差。伺服系统的性能决定数控机床的最高运动速度、定位及跟踪精度、零件加工的表面质量、生产效率及工作可靠性等技术指标,是数控系统和机床本体间的电传动联系环节。提高伺服系统的设计可靠性可采取诸如交流驱动取代直流驱动、数字控制取代模拟控制、产生交流数字驱动系统等方法来增强柔性,大大提高了设计可靠性。

在机床可靠性研究方面,吉林大学的申桂香等人提出通过一种客观赋权的熵权

法来评价数控机床的可靠性,有效克服了加权综合评价法中主观确定权重的缺陷。其方法是根据所构建的综合评价指标体系(平均首次故障间隔时间 MTTF、平均故障间隔时间 MTBF 和当量故障率 D)和两种加工中心的可靠性数据,计算出各个指标的权重并对加工中心的可靠性进行了综合评价。装甲兵工程学院的贾志成等认为产品寿命分布模型是评价和提高产品可靠性水平的基础,进而提出对加工中心进行可靠性现场试验,对获取的故障数据进行曲线拟合和假设检验等数据分析和处理,得出加工中心寿命分布的数学模型,从而为加工中心可靠性特征量的评定和采取可靠性增长的技术措施提供了理论上的依据。在机床 FMECA 分析方面,吉林大学的贾亚洲等根据某型号数控系统 1 年半的故障数据,对其进行了故障部位和故障模式分析,并应用 FMECA 法对故障多发部位进行了进一步的研究,同时指出了该数控系统及其相关功能部件的可靠性薄弱环节,为数控系统的可靠性设计和分析提供了依据。

1.5 可靠性学科研究的范畴

可靠性学科就是定量地研究产品动态质量问题的一个学科。它对推动产品设计、分析的现代化提供了必要的理论基础和分析方法。可靠性学科所包含的内容相当广泛,大致可包含三个方面:可靠性数学;可靠性物理(失效分析);可靠性工程。

(1) 可靠性数学

可靠性数学主要是研究解决各种可靠性问题的数学模型和数学方法。它属于应用数学的研究范畴,涉及的面非常广,主要内容是概率论和数理统计、随机过程、运筹学、模糊数学等。需要说明的是随着可靠性学科的发展,可靠性数学已不是简单地应用现有的数学知识,而是在此基础上有了更广、更深入的研究,已经形成为一门相对独立的数学。

(2) 可靠性物理(失效分析)

可靠性物理(失效分析)是研究失效现象及其机理和检测方法的学科。美国 Rome 航空发展中心(RADC)于 20 世纪 60 年代初首先进行失效物理的研究,发展失效分析方法和技术,研究各种元器件的失效机理及失效模式,建立各种器件及材料失效的数学及物理模型。

(3) 可靠性工程

可靠性工程是对产品(零件、部件、设备或系统)的失效现象及发生概率进行分析、预测、试验、评定和控制的边缘性工程学科。它的发展与概率论和数理统计、运筹学、系统工程、环境工程、价值工程、人机工程、计算机技术、失效物理学、机械学、电子学等学科有着密切的联系。需强调指出的是可靠性工程不仅重视

技术，也非常重视管理。可靠性管理包括设计、生产和使用过程的管理，即全过程、全寿命期的管理。具体的可靠性管理包括制定可靠性计划，组织可靠性设计评审，进行可靠性认证，制定可靠性标准，确定可靠性指标等。可靠性工程研究的对象包括电子和电气的、机械和结构的、零件和系统的、硬件和软件的可靠性设计、试验和验证。

第2章 可靠性设计基础

2.1 概述

产品具有价值和使用价值。

工业产品的使用价值是用来满足用户的一定需要，并且能实现一定的功能。功能是产品的主要质量特性，有功能才有使用价值。产品的其他质量特性都是围绕功能特性展开的，其目的也是为了实现产品的功能。产品如果能在使用过程中实现其预定的功能，达到规定的质量要求则认为是可靠的，否则认为是不可靠的，这就出现了产品的可靠性问题。

可靠性是产品的重要质量特性。

可靠性设计是以实现产品的可靠性为目的的设计技术。它包括为实现产品的可靠性所必需的设计和全部计划项目，并使产品的可靠性得以保持的一系列设计程序。可靠性设计包括的内容是非常广的，它贯穿于产品的整个寿命周期。本章主要介绍机械产品可靠性设计中的一些专有技术。

2.2 可靠性定义及方法

2.2.1 可靠性的定义

可靠性的经典定义是：“产品在规定条件下和规定时间区间内，完成规定功能的能力”。

可靠性包括广义可靠性和狭义可靠性两种。广义可靠性是指产品在整个寿命周期内完成规定功能的能力。它包括狭义可靠性和维修性。狭义可靠性是指产品在规定时间内发生失效的难易程度；维修性是指可修复产品发生失效后在规定时间内修复的难易程度。对不可修复的产品（包括不值得修复的产品）只要求在使用过程中不易失效，即要求耐久性；对可修复的产品不仅要求在使用过程中不易发生故障，即无故障性，而且还要求发生故障后容易维修，即维修性。

按产品可靠性的形成，可靠性可分为固有可靠性和使用可靠性。固有可靠性是通过设计、制造赋予产品的；使用可靠性既受设计、制造的影响，又受使用条件的影响。一般使用可靠性总是低于固有可靠性。

2.2.2 可靠性设计程序和手段

可靠性设计的一般程序和手段如图 2-1 所示。

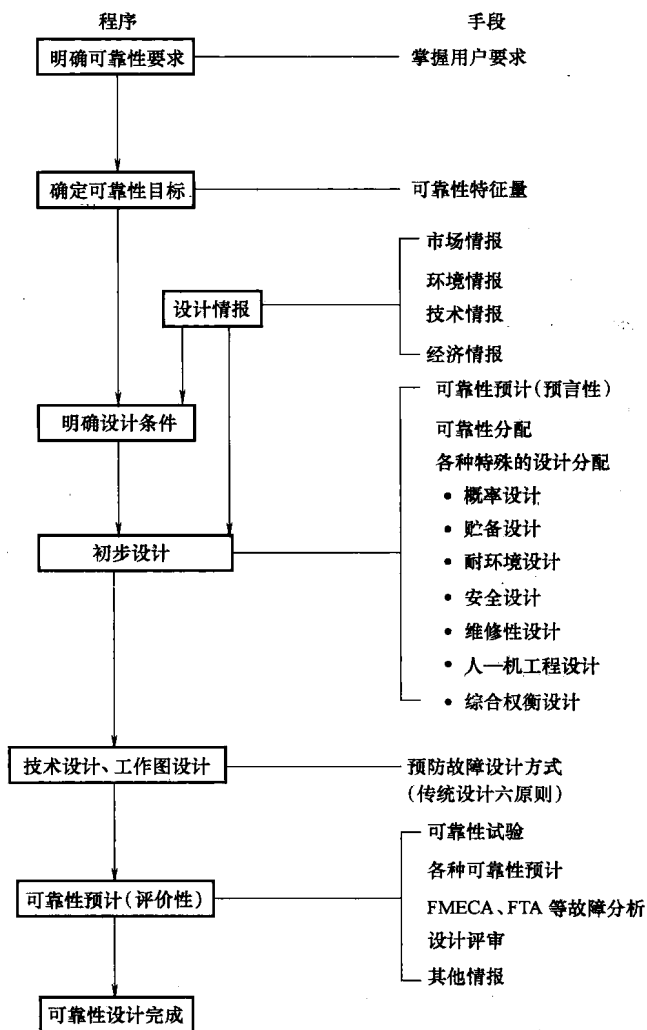


图 2-1 可靠性设计程序和手段

2.2.3 可靠性设计的目标值

可靠性设计首先要明确对产品可靠性的要求，确定可靠性的目标。一般除特殊用户在用户的技术要求中明确给出可靠性规格和目标值外，用户很少提出对产品可靠性的定量要求。通常是生产厂家在了解用户的要求、竞争企业的动向、技术水平

的现状和发展趋势等基础上确定可靠性的目标值。

在确定产品可靠性目标值时,应选择适合使用条件的可靠性特征量作为可靠性指标。各类产品常用的可靠性指标如表 2-1 所示。表 2-2 列出可靠度值分类等级及应用情况举例供设计时参考。

表 2-1 各类产品常用的可靠性指标

使用条件	连续使用				一次使用	
可否修复	可修复		不可修复		可修复	不可修复
维修种类	预防维修	事后维修	用到耗损期	一定时间 后报废	预防维修	
产品示例	电子系统、 计算机、通信 设备、雷达、 飞机、生产设 备	家用电器、 机械设备	电子元器 件、机械零 件、一般消费 品	实行预防维 修的零部件、 广播设备用电 子管	武器、过载 荷继电器、救 生器具	熔丝、闪 光灯、雷管
常用指标	可靠度、有 效度、平均无 故障工作 时间、平均修 复时间	平均无故障 修复时间、有 效寿命、有效 度	失效率、平 均寿命	失效率、更 换寿命	成功率	成功率

表 2-2 可靠度分类等级及应用情况

等 级	可靠度 R	应 用 情 况
0	<0.9	不重要的情况,失效后果可忽略不计,例如:不重要的轴承 $R=0.5 \sim 0.8$; 车辆低速齿轮 $R=0.8 \sim 0.9$
1	≥ 0.9	不很重要的情况,失效引起的损失不大,例如:一般轴承 $R=0.9$; 易维修的农机齿轮 $R \geq 0.90$, 寿命长的汽轮机齿轮 $R \geq 0.98$
2	≥ 0.99	重要的情况,失效将引起大的损失,例如:一般齿轮的齿面强度 $R \approx 0.98$, 弯曲强度 $R \approx 0.999$; 高可靠性齿轮的齿面强度 $R \approx 0.999$, 弯曲强度 $R \approx 0.9999$; 寿命不长但要求高可靠性的飞机主传动齿轮 $R=0.99 \sim 0.9999$ 以上; 高速轧机齿轮 $R=0.99 \sim 0.995$; 建筑结构件:失效后果不严重的次要建筑 $R=0.997 \sim 0.9995$ (塑性破坏取低值,脆性破坏取高值,下同),失效后果严重的一般建筑 $R=0.9995 \sim 0.9999$, 失效后果很严重的重要建筑 $R=0.9999 \sim 0.99999$
3	≥ 0.999	
4	≥ 0.9999	
5	1	很重要的情况,失效会引起灾难性后果,由于 $R > 0.9999$, 其定量难以准确,建议在计算应力时取大于 1 的计算系数来保证

2.2.4 可靠性设计方法

由于不同产品及其构成部分具有各种差异,因此应采取不同的可靠性设计方

法。可分为：

(1) 预防故障设计

预防故障设计是由经验积累形成的设计方法，一般考虑下述原则。

- 1) 采用成熟的经验或经试验验证了的方案。
- 2) 简化结构，减少零部件的数量。
- 3) 尽量采用标准化、通用化的零部件。
- 4) 重视维修性，力求使产品的检修、调整、拆换方便。
- 5) 重视关键零件的选材和可靠性。
- 6) 充分运用故障分析的成果，及时反馈，尽早改进。

(2) 概率设计

概率设计是将所设计零件的失效概率限制在允许的范围内，以满足可靠性定量要求的要求。

(3) 贮备设计

贮备设计是对完成同一规定功能的部分设置重复的结构，以备局部发生故障时，整机仍不致丧失功能的设计方法。

(4) 耐环境设计

耐环境设计是在设计阶段就考虑产品在整个寿命周期内可能遇到的各种环境条件的影响，相应地进行耐温设计、耐湿设计、耐振设计等，以提高产品耐环境的能力。

(5) 安全设计

安全设计是针对失效后会造成人员伤亡或引起重大经济损失的情况，保证有一定的安全水平。一般可从以下几个方面着手：

- 1) 故障安全设计。当万一发生故障时，装置自动趋于安全。例如，铁路信号装置就设计成一旦故障肯定为红色信号。
- 2) 防误操作设计，是设计成不会发生误操作的构造。
- 3) 故障检出或监测设计，是在生产线上附加检测系统以检出显在故障和监测潜在故障。
- 4) 人员防误设计，是设置安全防护装置。

(6) 维修性设计

维修性设计是在设计阶段就考虑维护和修理的方便，以便发生故障后能迅速修复而达到提高有效度的目的。主要应做到：①检测方便，缩短故障的诊断、定位时间；②装拆方便，便于维修操作，缩短排除故障的时间；③维修所需工具、设备简单，必要时满足维修性指标。

(7) 人一机工程设计

人一机工程设计是在设计阶段为减少人的差错，发挥人和机器各自的特点以提

高产品的使用可靠度。主要应做到：①指示系统可靠，不仅显示器可靠，而且显示方式、显示器配置等都应使人易于无误地接受；②控制、操作系统可靠，不仅仪器及机构有满意的精度，而且适于人的使用习惯，便于识别操作，不易出错，与安全有关的应有防误措施；③操作环境尽量适于人的工作需要，减少引起疲劳、干扰操作的因素。

(8) 权衡设计

权衡设计是指在可靠性、维修性、安全性、功能、重量、尺寸等质量与价格、交货期之间综合权衡寻求最佳方案的设计。

2.2.5 可靠性设计的其他方面

初步设计阶段，应分析类似产品过去的故障情况、原因、该故障对系统的影响、故障发生的概率等，并通过零部件的概率计算，参考各种设计情报进行初步的可靠性预计。当产品是由若干个子系统或零部件组成时，应进一步将可靠性指标的目标值分配给各组成部分，即进行可靠性分配。

在各子系统及零部件分配得到可靠性目标值之后，利用2.4节介绍的可靠性设计方法进行零部件的初步设计，并进行技术设计。然后再进行可靠性预计以保证满足可靠性指标的目标值。做必要的可靠性试验；对重要的部分用故障模式、影响及危害度分析(FEMCA)、故障树分析(FTA)等方法进行可靠性、安全性分析；邀请有关各方面人员专家就可靠性进行评议审查。将设计的缺陷、潜在的故障原因、弥补的对策反馈给设计人员，进行改进设计，逐步完成可靠性设计。

2.3 可靠性中常用的概率分布

载荷、强度、寿命、变形等是可靠性设计中涉及的重要指标。这些指标一般都是随机变量，有一定的取值范围，服从一定的统计分布。

可靠性中常用的概率分布如表2-3所示。其中常用的正态分布函数表和 Γ 函数表如表2-4、表2-5所示。

表 2-3 可靠性中常用的概率分布

名称记号	概率密度	均值 $E(X)$	方差 $D(X)$	图 形
均匀分布 $u(a, b)$	$f_u(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 0, & x < a \text{ 或 } x > b \\ -\infty < a < b < \infty \end{cases}$	$\frac{a+b}{2}$	$\frac{(b-a)^2}{12}$	