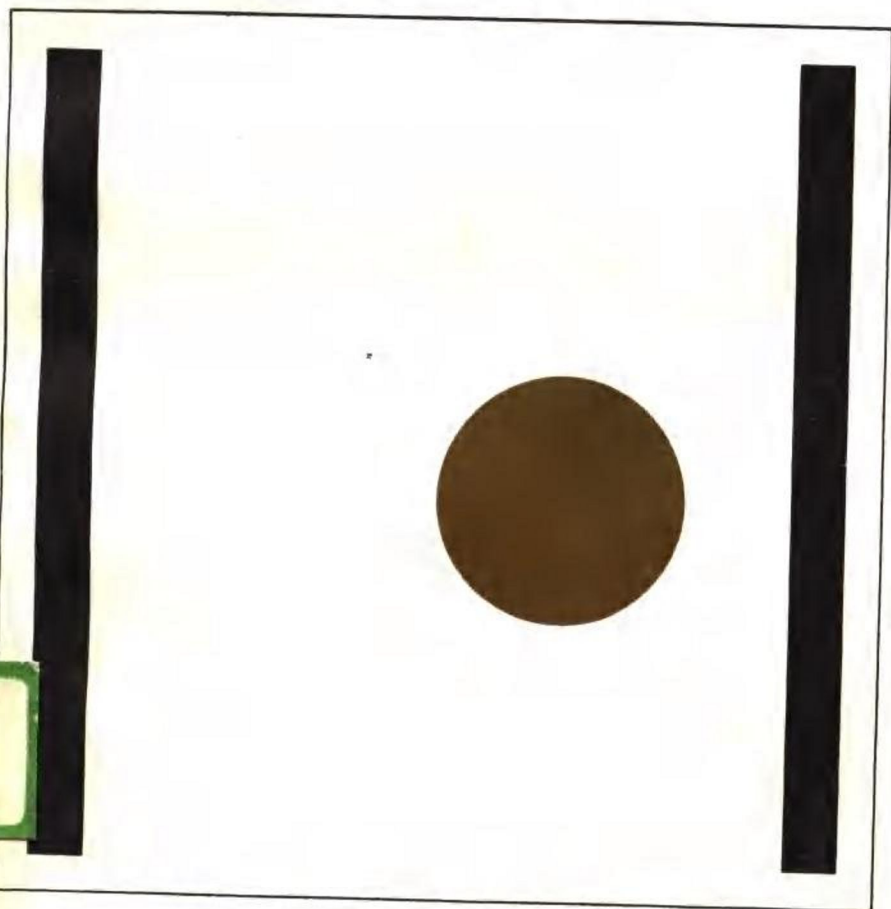


可靠性与质量管理丛书

可靠性工程概论

何国伟 编著

KEKAOXING YU ZHILIANG
GUANLI CONGSHU



内 容 简 介

本书全面地介绍了可靠性工程的各个方面,可靠性数学、可靠性设计、生产及工艺可靠性、可靠性试验、维修性、可靠性管理、可靠性基础工作。对近年来国内外新开展的可靠性工作如:寿命周期总费用分析、可靠性增长、PDA控制、专控生产、高效应力筛选、PPM管理、元器件认证、数据交换网、可靠性标准等亦作了简要的介绍。

本书可供具有高中数学水平的机关及企业的管理及技术干部作为全面了解可靠性工作及实施可靠性管理的参考书或短训班教材,亦可供大专院校作为可靠性工程的入门教科书。

可靠性与质量管理丛书

可靠性工程概论

何国伟 编著

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168 1/32 印张10 260千字

1989年9月第一版 1989年9月第一次印刷 印数: 0,001—6,180册

ISBN 7-118-00032-9/F1 定价: 3.45元

出版说明

“企业的技术开发工作要特别重视新产品试制、中间试验、生产性试验以及解决工业化生产中的质量、可靠性、经济性、成品率等一系列工艺和设备问题。”（《中共中央关于科学技术体制改革的决定》1985年3月13日）

产品的可靠性是产品质量的重要组成部分。质量与可靠性是国内及国外市场竞争中能否胜利的决定因素。质量及可靠性要从产品的设计、试制抓起，把质量与可靠性设计到产品中去，贯彻在从试制、试验、生产到使用的各个阶段中。提高产品的质量和可靠性将给研制生产单位带来巨大的经济效益，也带来巨大的社会效益。鉴于国内还没有全面地从各个专题方面介绍可靠性及质量管理方面的著作，本社特委托何国伟同志组织国内有关方面的专家，编著了这套《可靠性与质量管理丛书》，并由何国伟同志担任本丛书的主编。本丛书的目的在于培养可靠性工程和全面质量管理的专业人材，以保障和提高产品质量。

本丛书适用于大专以上的工程技术人员和管理人员，主要用于在职教育，也可供大专院校教学参考。

前 言

几年以前，在钱学森同志主持的国防科技工业系统的可靠性工作会议上，总结出几条重要的可靠性工作经验：“产品的可靠性是设计出来的！是生产出来的！是管理出来的！”；“设计决定了产品的固有可靠性”；“单靠试验不能保证高可靠性，单靠检验也不能保证高可靠性，但试验及检验工作要加强”；“单靠可靠性数学更得不到高可靠性，但可靠性数学作为一个工具应推广普及”。当提高产品的质量及可靠性已成为国策的今天，这些经验值得所有部门的人员重视。

近几年来，国内出版了不少可靠性的讲义及著作，这是一个可喜的现象。但遗憾的是，相当多的资料有意无意地把可靠性数学这一工具作为可靠性工程的主线。例如维修性工程本来是一门工程设计、工艺、管理为主的技术，但有些资料却使人容易误会成为它是可靠性数学的一个分支。这样，使一些工程人员产生误解，甚至望而却步。

本书企图全面介绍可靠性工程的各个方面的基本内容：包括“可靠性设计”、“生产及工艺可靠性”、“可靠性试验”、“维修性”、“可靠性管理”及“可靠性基础工作”，当然也包括作为可靠性工程的重要工具“可靠性数学”。（本丛书各册需要的可靠性数学的基本知识在本书中介绍）。

本书也简要地介绍了国内外近年来开展的新的可靠性领域的工作，如“寿命周期总费用分析”、“可靠性增长”、“PDA 控制”、“专控生产”、“高效应力筛选”、“PPM管理”、“元器件认证”、“数据交换网”、“可靠性标准”等等。

本书可供机关、企业的管理及技术干部作为全面了解可靠性工程及实施可靠性管理的参考书或短训班教材；也可供大专院校

作为可靠性工程的入门教科书。

阅读本书要求具备高中数学基础。本书极个别地方用到一些微积分公式，有困难时可忽略不学，不影响对本书的理解。

希望得到批评指正，使本书能成为引玉之砖，为四化尽一点微薄的力量。

在编写本书过程中，曾得到了航天部、电子部领导和同志们
的支持和关心，在此谨向他们致谢。

何 国 伟

本书所用符号表

A, B, \dots	事件。
\bar{A}	事件 A 的余事件。
$E\{X\}$	随机变量 X 的期望 (均值)。
$f(x)$	随机变量的概率密度函数。
$F(x)$	随机变量的累积分布函数。
$N(\mu, \sigma)$	均值为 μ 、方差为 σ^2 的正态分布。
$N(0, 1)$	标准正态分布。
n	子样大小。
$P(A)$	事件 A 出现的概率。
$Q(u)$	即 $1 - \phi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_u^\infty e^{-\frac{t^2}{2}} dt$
s^2	子样方差。
$V\{X\}$	随机变量 X 的方差。
X, Y, \dots	随机变量。
x_1, x_2, \dots	子样个体特性值。
$x_{(1)}, x_{(2)}, \dots$	把子样个体特性值按从小到大排列后的第 i 个值。
\bar{x}	子样均值。
α	指定的小概率。
γ	置信水平, $\gamma = 1 - \alpha$ 。
σ^2	方差。
μ	随机变量的均值。
$\Phi(u)$	标准正态分布的累积分布函数。
θ	平均寿命。
λ	故障率。

\in	属于。
\notin	不属于。
\cup	和集符号。
\cap	交集符号。
\wedge	估计值符号。

目 录

第一章	引言	1
1.1	可靠性及其经济效益	1
1.2	可靠性工程的发展简史	5
1.3	可靠性工程的基本内容	9
第二章	可靠性数学	12
2.1	故障（失效）	12
2.2	随机变量	14
2.3	故障率	27
2.4	常用分布	29
2.5	浴盆曲线	48
2.6	故障数据的统计处理	49
2.7	参数的点估计及区间估计	56
第三章	可靠性设计	71
3.1	寿命周期总费用及年金	71
3.2	可靠性模型及冗余技术	75
3.3	FTA及FMEA	81
3.4	可靠性分配	88
3.5	可靠性预测	89
3.6	应力-强度可靠性分析	95
3.7	降额设计	104
3.8	设计评审	108
3.9	可靠性增长及其评估	112
3.10	软件可靠性	121
第四章	生产及工艺可靠性	130
4.1	半导体工艺可靠性	130
4.2	元器件的专控生产	137
4.3	可靠性筛选及高效应力筛选	139

4.4	电装焊接工艺的可靠性	155
4.5	元器件的入库检验	161
4.6	人员操作的可靠性	164
4.7	整机电老炼	166
4.8	控制图及PDA工艺控制	167
4.9	PPM(百万分之一) 管理	172
第五章	可靠性试验	179
5.1	环境条件	180
5.2	环境试验	189
5.3	可靠性验证试验	205
第六章	产品的维修性	211
6.1	维修性及维修性要求	211
6.2	维修性规划	219
6.3	维修性设计: 维修性分配	226
6.4	维修性设计: 维修性预计及设计评审	234
6.5	维修性的检测诊断	244
6.6	维修性数据的收集及分析	247
6.7	维修性验证	249
第七章	可靠性管理	253
7.1	可靠性管理规划	253
7.2	可靠性设计管理	260
7.3	可靠性试验管理	275
7.4	故障报告、分析及改进系统及故障审查委员会	277
第八章	可靠性基础工作	280
8.1	失效物理	280
8.2	可靠性标准	289
8.3	电子元器件的质量认证	292
8.4	可靠性数据交换网	298
附表	正态分布尾数表	304

第一章 引言

1.1 可靠性及其经济效益

产品的可靠性

可以对其进行一系列观测、分析、研究的一件具体的或一般的物体(例如一台电视机),以及一定数量的物质(例如一公斤环氧树脂),都叫做一个个体。所考虑的个体的全体叫“总体”(population)。

本书所说的“产品”有两种含义。一种含义是指分析、研究、试验的个体对象。这对象可以是硬件,例如某一个元、器件,零、组、部件,某一台电视机、设备,或某个系统,等等;也可以是软件,例如上海牌电视机的维修指南,3 DG系列晶体管的生产质量控制文件等等。另一种含义是指分析、研究、试验的总体对象,例如1985年12月生产的飞跃牌电视机全体。

一个产品有按规定应完成的功能。产品丧失规定的功能叫“失效”(failure)。如果产品在失效后可以修复,则叫“可修复产品”(例如家用电视机);如果产品在失效后不能或不值得去修复,则叫“不可修复产品”(例如电子元、器件)。对可修复产品的失效,通常也称“故障”。

一个生物从出生、成长到死亡,这一段时期叫生物的“寿命周期”(life cycle)。与此相似,产品也有其寿命周期。产品的寿命周期有两种含义:

1. 是指产品从出厂、交付使用到退出使用为止这一段时期。产品的使用方通常使用这个含义。这里的“退出使用”,可能是产品已不能完成规定功能,也可能是再要继续使用也可完成规定功能,但所需的维修使用费用太高,在经济上是不划算的。产品从出厂起到不能完成规定任务为止的时间叫产品的“寿命”。产品从

出厂起到从经济上分析已不值得再继续使用为止的时间叫产品的“经济寿命”。产品的经济寿命一般比产品的寿命短。

2. 是指产品从研制开发一直到停止生产及维修为止这一段时期。产品的生产方通常使用这个含义。

产品的可靠性有广义与狭义两种含义。“狭义可靠性”指产品在规定条件下（例如一定环境）某一规定时间内完成规定功能不发生故障或失效的可能性（用数学语言说是不发生故障或失效的概率）。例如设某牌电视机每小时发生故障的可能性（即概率）为 1.5×10^{-4} ，即大体上15000台电视机在工作一小时内有一台会发生故障，这就是某牌电视机的狭义可靠性。“广义可靠性”指的是产品在规定条件下、在其整个寿命周期内完成规定功能的能力。广义可靠性包括了狭义可靠性在内，但还包括了在规定条件下使用的产品在规定时间内、按规定的程序和方法进行维修时，保持或恢复到能完成规定功能的可能性（概率）即产品的“维修性”（maintainability）。

可靠性与质量的关系

产品的可靠性与产品质量有什么关系呢？产品的可靠性按定义是在规定条件下和规定时间内完成规定功能的能力，这就是产品质量的主要内容。但是产品可靠性不是产品质量的全部内容。例如人们购买家用电视机当然首先关心的是它的可靠性，平均使用多少小时出故障？它的图象清晰度、色彩、对比度、音量、音色等是否满足规定的指标要求？但是家用电视机还有另一个质量要求，它作为家庭的室内装饰品，要求色彩柔和美观大方，这就不是产品可靠性的内容。所以产品质量还包括产品可靠性以外的内容。但一般说来，那些质量要求比起可靠性要求来说要容易达到得多。

既然产品可靠性是产品质量的重要内容，为什么还要把可靠性从质量中分离出来研究讨论呢？这是因为长期以来，人们对质量的理解不太全面，往往在质量指标中忽略了关键的可靠性指标。

以国产电视机为例，全国第一届电视机质量评比时，沪产电视机得到了第一、二、三名，1979年1月得到了奖状。但好景不

长，到5月份起在广州使用的沪产电视机大量出现打火冒烟以至无光、无声及其它故障现象。不久在上海，后来在北京使用的沪产电视机，亦大量出现这类故障。群众反映：沪产电视机要配套电风扇，边扇边看，以至边歇边看、边敲边看。报纸上出现了漫画，说沪产电视机可以看四部电影：“多瑙河之波”（屏幕上只有波状条纹），“冲破黎明前的黑暗”，“看不见的战线”，“今天我休息”。群众来信告到中央及国务院，中央领导作了重要批评说：“这已不仅是经济问题，而成为政治问题了”。为什么得到了全国电视机质量评比第一、二、三名的沪产电视机落得如此狼狈呢？因为第一届电视机质量评比的质量指标虽然包括：黑白对比度、音量、音色等性能指标（这也是可靠性指标中性能可靠性指标的一部份），但却没有列入最主要的可靠性指标：环境适应性及平均寿命。电视机于夏天环境温度一高时不能正常工作，只能看“看不见的战线”，黑白对比度再好有什么用？但是当时电子部及公司下达的质量指标确实都超额完成了。由于没有提关键的可靠性指标，所以尽管达到部颁标准，但大大不能满足群众使用要求。

为了弄清当时国产电视机的可靠性，进行了国产电视机的可靠性试验。试验结果是：沪产电视机的平均寿命不到500小时（但还是全国第一，说明那时国产电视机的可靠性水平是很可怜的）。出厂一年内的平均返修率达86.92%（有的型号返修率竟高达274%），其中第一个月的早期返修率为20.8%。甚至还经受不住运输振动，从电视机厂运到商店的開箱不合格率达23.6%。

为了突出产品可靠性在产品质量中的地位，另外，提高可靠性的技术与传统的质量管理技术有继承的部份，但有更多新的发展及补充，因此把“可靠性”从“质量”分离出来加以强调。

可靠性的经济效益

在当年全国广播电视会议上，实践使我们认识到可靠性的重要性。吕宗瑜同志在会上算了一笔帐。按当时的电视机预测产量，从1980年的年产200万台起，年增长率15%计算，到1990年将累计生产4868.9万台。以每台400元计的累计产值为194.78亿元（不算

资本增值，下同)。设电视机修理一次的平均费用为10元，如平均寿命为500小时，用户累计付出的维修费用为19.6亿元；如平均寿命为1000小时，则用户累计付出的维修费用为14.3亿元；如平均寿命达1万小时，则用户累计付出的维修费用只有2.3亿元。因此，如果能将电视机的平均寿命从当时的500小时提高到一万小时，则到1990年为止，用户就可省下维修费用17.3亿元。从而，为提高电视机可靠性即使花上几个亿，仅从节省用户的维修费用来说，也是值得的。

产品质量好的另一个通俗含义是“价廉物美”。物美的主要含义就是可靠性高。对于价廉一点，有些人有不正确的理解，认为提高产品的可靠性必然大大提高成本，从而物美必不价廉。实践证明，这样理解是错误的，客观规律是“产品的可靠性上去了，

项 目	1978年	1983年
平均寿命	<500小时	≥5000小时
商店开箱不良率	23.6%	<2%
一个月早期返修率	20.8%	<2%
一年平均返修率	86.92%	13.28%*
安 全 性	安全性很差、燃烧、爆炸、触电事故屡有发生。	接近IEC65号公告标准，能保证使用者安全。
总 产 量	26.8万台	126.37万台*
成本(12频道31厘米机平均)	351.35元	247.56元
每台平均盈亏	亏损34.92元	盈利52.86元*
总 盈 亏	亏损936万元	盈利6680万元*
进出口情况	1978年起，外国电视机大量进口，在国内市场不凭票可供应	外国电视机停止进口，沪产电视机畅销全国。并开始少量出口，打入国际市场。
用户反映	用户批评上告，商业索赔退货，报纸四幅漫画批评。	用户信任，市场旺销，三个主要牌号全部获得国家银质奖

* 系1982年数据

成本就下降了”！

上海广播电视公司从1978年到1983年，狠抓了产品的可靠性与质量管理，五年前后电视机的主要数据及情况对比见上页表。

这些数据表明[●]，五年内，在产量大幅度增长的情况下，沪产电视机的可靠性增长了一个数量级，对用户来说一台可顶过去几台用，有巨大的社会效益；企业扭亏为盈。五个电视机厂每年盈利总值相当于五个厂全部固定资产净值。维修费用大幅度下降，原平均每台一年维修费高于8元，现降低到2元以下。以500万台计算，社会用户每年可以减少维修费3000万元。又沪产电视机的销售价比国内一般电视机销售价每台高30元以上，以年产140万台计算，仅此一项就可以为国家增利4200万元以上。国家、企业和用户都获得了很大的经济技术效益。

上海广播电视公司及其它一些单位的经验都证明：抓产品的可靠性要投入一些资源(包括人力、物力、财力等等)，但可产出巨大的社会效益及经济效益。所以从效益/成本比来说，是极为值得的。

1.2 可靠性工程的发展简史

提高产品的可靠性需要科学的设计、生产、管理技术。“可靠性工程”(Reliability Engineering)就是为了使产品达到可靠性要求而需要的一系列设计、研制、生产、维修、使用与管理的技术。它是近二三十年来兴起的一门新兴学科。

可靠性工程可以说是从二次大战中研究高可靠电子管(reliable tube)开始的，并逐步向材料等方面扩展。美国以军方为主组织或扶植成立了VTDC(Vacuum Tube Development Committee, 1943), PET(Panel on Electron Tube 1946), ARINC(Aeronautical Radio Inc. 1946), AMC(Air Material Command 1947), ARD(Air Research and Development Command. 1950)等研究机构及组织。在朝鲜战争时期，美国的军用设

● 引自傅光明《民用电子产品可靠性管理实践五年》，上海广播电视工业公司1983.11

备的可靠性问题极为严重。飞机有60%由于出故障维修而不能使用，电子设备的50%在贮存时就出故障，轰炸机电子设备的平均寿命只有20小时，雷达由于出故障维修的不能工作时间达84%，潜艇的声纳则为48%。有鉴于此，美国从1950年起，由三军、参谋长联席会议、军需局、学会团体等选拔专家组成国防部电子设备可靠性专门工作组（Ad Hoc Group），总结当前三军电子产品的可靠性问题及制订可靠性规划。1952年提出报告，1952年8月，改组为国防部电子设备可靠性顾问团，简称AGREE（Advisory Group on Reliability of Electronic Equipment），是国防部助理部长办公室的一个组成部份。其任务是制订从技术上和组织上能够提高电子设备和元件可靠性的方法和途径。1957年7月，AGREE的几个工作组共同起草并发表了有名的AGREE报告，建议建立电子设备及元、器件的可靠性指标，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、评定和鉴定的方法，提出了电子产品在生产、包装、贮存、运输等方面要注意的问题及要求等等。AGREE报告是电子产品可靠性工程工作的指导性文件，直到今日仍有重大的参考价值。

通常把到1957年美国AGREE报告发表为止以前叫可靠性工程的第一阶段，称为可靠性工作的“调查研究阶段”。在这一阶段内，主要是开展了以电子管为重点的电子元、器件现场数据收集与分析的可靠性研究，引入概率统计方法，研究以振动冲击为重点的环境试验方法及寿命试验方法，成立了专门的可靠性组织，AGREE报告为本阶段的代表性总结。

落实可靠性工作的第一条是组织落实，由于电子元、器件的可靠性是电子设备可靠的基础。1954年，美国参谋长联席会议批准成立国防部电子元、器件顾问组（Advisory Group on Electronic parts）。为了制订各种导弹可靠性计划的行之有效的整套监督规划与管理程序，美国于1957年成立了由导弹局局长领导的国防部导弹可靠性专门委员会。1958年发表了研究报告。根据这一报告，军事部门建立了一套可靠性管理程序，使得AGREE、

AGET (电子管顾问组 Advisory Group on Electron Tubes)、AGEP等单位的建议得以贯彻,以保证军用电子系统的可靠性。

1958年6月,美国成立了元、器件可靠性管理规范委员会(Ad Hoc Group on Electronic Parts Specification Management for Reliability),以后,又制定并公布了各种电子元、器件的可靠性军用标准。严格控制生产过程的每一个关键环节。使得按军用标准生产的电子元、器件可以保证达到一定的可靠性水平。

为了核实及比较电子元、器件的现场可靠性数据,美军规定三军的电子产品的故障数据必须通过数据情报反馈网提供给数据中心。建立了失效数据中心(FARADA)及三军数据交换网(IDER),后来IDER扩大为政府与工业界数据交换网(GIDEP)。数据交换中心负责统计并公布电子元、器件的现场可靠性。

围绕可靠性的学术活动亦积极开展。1954年在纽约召开了第一届国际质量控制及可靠性学术会议。日本科技连于1958年成立可靠性研究委员会并于1971年召开第一届可靠性会议,以后每年一次。我国由于众所周知的原因,比先进技术国家晚一些。全国国防系统的第一次可靠性学术会议是1978年在钱学森同志关心下召开的。

1954年至1962年可以认为是可靠性工程的第二阶段,称为可靠性工程的“统计试验阶段”。在这一阶段内,主要是:制订可靠组织管理规范;制订电子产品的可靠性标准;研制环境与可靠性试验设备;研究产品寿命的抽样试验方法;研究可靠性设计技术;建立可靠性数据收集与交换网;并将可靠性研究扩展到维修性研究。1962年,在美国召开了第一届国际可靠性及维修性学术会议。

进入60年代后,以导弹系统为首的尖端技术对产品提出了高可靠性要求。例如民兵Ⅱ型导弹弹上电子计算机的集成电路的平均寿命要求达 10^8 小时以上。单纯依靠现场数据,已不能对产品是否达到高可靠性进行全面分析或评比。需要探索元、器件内在的本质缺陷,研究故障产生的物理、化学机理及其规律。在某些情况下,需要深入到分子、原子的水平来分析阐明故障的原因,在

此基础上进行产品可靠性分析及改进。这就是“故障物理”或“可靠性物理学”。美国的罗姆空军研制中心(RADC)就是一个重要的故障物理学研究中心。正常条件下的试验方法已不能在短时期内对产品的高可靠性进行评定或鉴定，所以需要研究针对高可靠性特点的试验设计及分析、评定方法，这就是所谓“可靠性试验学”。

60年代可以认为是可靠性工程的第三阶段称为可靠性工程的“可靠性物理研究阶段”，在这一阶段内，主要是用可靠性物理对元、器件及材料的故障或失效进行分析研究及改进；研究发展可靠性试验学，力图在较短时间内暴露产品的薄弱环节及掌握其故障或失效规律；各先进技术国家成立了可靠性学术团体及定期进行学术交流；建立了国家及企业的可靠性组织；进一步研究可靠性设计及工艺；组建元、器件的高可靠性生产线。

60年代以后，对产品的可靠性要求愈来愈高。如果等待产品在使用中出现了问题再来解决是等不及的。因此要求在产品设计一开始就要考虑产品可靠性的问题。美国洛克希德公司的型号经理高文俊先生向作者介绍他们的经验时说：“一定要把可靠性设计到 (design into) 产品里去！”也就是这个意思。这就要把产品可靠性作为产品的一项重要设计指标，将它分配给产品的各组成部份（分系统、整机、设备、……，一直到元器件、材料、工艺）。根据所分配的可靠性要求进行分析、设计、预计、评定和验证。生产部门为了保证设计的可靠性指标得以实现，要在元器件、原材料、外购件、工艺、环境、人员培训、检验、质量控制等各个方面采取相应的可靠性措施加以保证。在产品投入市场后，还要有一整套的使用培训、维修、修理、备件等工作相配合，才能保证产品在使用中的可靠性。因此从产品的科研、生产到使用服务的各个阶段都要贯彻以可靠性为主的质量管理，这是第一个“全面”。由于现代产品的复杂性，企业任何一个小环节的失误都有可能导致重大的损失，最典型的要数美国的航天飞机挑战者号的失事，它是由于后侧助推火箭密封圈不可靠引起的。因此产品的高质量高可靠性要企业的管理部门、各研究室、试验室、车间以