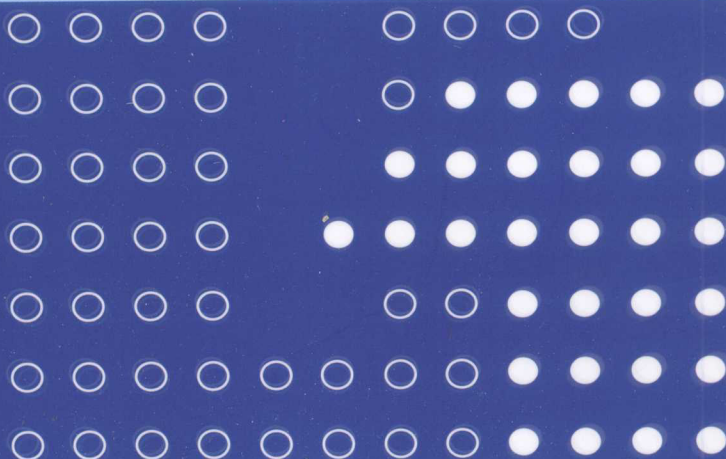


张增照 编著

以可靠性为中心的 质量设计、分析和控制



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

以可靠性为中心的 质量设计、分析和控制

张增照 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书主要介绍了以可靠性为中心的质量设计、分析和控制理论、方法与技术,并列举了大量案例。全书共分 5 篇,33 章。第一篇导引篇主要论述了为什么要以可靠性为中心;第二篇可靠性基础篇,包括可靠性指标、模型、预计、分配、FMEA 和 FTA 等;第三篇可靠性设计篇,包括元器件选用、降额、容差与漂移设计、冗余设计、电路简化设计、潜在通路、“三防”、热设计和静电防护等 12 项内容;第四篇管理控制篇主要介绍可靠性的控制管理,包括供应商的控制、元器件质量控制、统计过程控制、质量闭环控制和可靠性评审等;第五篇试验评价篇,包括可靠性测定试验、鉴定与验收试验、筛选试验、增长试验、HALT/HASS 及加速寿命试验。

本书适用于电子产品设计和生产的相关人员,特别是一线的工程技术人员和管理人员,也可供高校教师 and 研究生参考,或作为培训教材使用。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

以可靠性为中心的质量设计、分析和控制 / 张增照编著. —北京: 电子工业出版社, 2010.7

ISBN 978-7-121-11069-6

I. ①以… II. ①张… III. ①电子产品可靠性 IV. ①TN606

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 108457 号

责任编辑: 秦绪军 文字编辑: 赵 娜

印 刷: 北京东光印刷厂

装 订: 三河市皇庄路通装订厂

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 26.25 字数: 670 千字

印 次: 2010 年 7 月第 1 次印刷

定 价: 59.80 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。

序

作者来我家，要我为他的书作序。我问了他三个问题：第一，他为什么要写这本书；第二，他怎样写的这本书；第三，他觉得他这本书写得怎么样。于是我们有了一番谈话，我本想，就把这个谈话记下来当序。等我把他送来的书稿，从头到尾，看了一遍之后，觉得还是要多写一点。

1963 年，我为来中科院数学所进修的海军军官讲过可靠性的课，除了之前曾有前苏联专家在四机部作过可靠性的报告，我的讲课，可以说是在国内最早的可靠性课程。其实，那时我并没有可靠性方面的实际经验，只是把美国在第二次大战后不久发布的 AGREE 报告的内容，再加上一点数学的东西，介绍给了那批学员。如今过了四十多年，看到这本书我真是高兴，我们终于有了既有理论知识，又有工作经验的可靠性专家了。

我跟作者的结识，是在中国工程院有关产品质量的咨询研讨会上。作者的发言留给了与会者很好的印象，得到了他们的赞赏。自那以后，我曾让我的博士生去广州专门向他求教。因此，我与他的谈话就单刀直入，不用客气了。

国内可靠性的书籍很多，但为可靠性的实际工作者写的却很少，能对他们有用的就更少，进而能让他们喜欢的就越发少了。作者写书的目的很明确，就是写给我们国家从事可靠性设计的实际工作者。因此他的写法也就考虑到了实际工作者的条件。可靠性的说明是需要数学描述的，作者不拘泥于数学理论的细节或烦琐，注意用最少的数学给读者讲清可靠性的逻辑关系。对于一些概念或量化的表示，作者用案例的形式加以解释，也是为了便于实际工作者理解。

最能突出说明作者意图的是第三篇的设计技术。如果没有深入和广泛的接触就难以写出如此为实际工作者着想的材料。正是在这件事情上，我同作者交换了一点意见。在进入具体的设计以前，要有个可靠性的预计。本书的第二篇对此有一个比较完整的讲述，给出了国际上和国内的手册和标准。这些都是一般或基础的要求。我曾在日本考察过电子产品的可靠性设计。他们的设计者手头都有元器件厂家提供的目录或产品手册，其中有各自产品详尽的可靠性参数的实测数据和参考售价。设计者据此可以选用既能保证质量又能降低成本的厂家产品。作者在第四篇介绍的供应商评估，是买方对卖方实施的工作。卖方自己应如何注意评估自己的产品，从而能向买方提供可靠的采购信息，也是我们的元器件厂家需要努力的工作。

作者是电子产品的专家，本书集中讨论的也是电子产品。现在几乎所有行业的产品都有可靠性的问题。机械产品中的汽车，早在 20 世纪 70 年代的后期，已经开始了实际的调查

研究。我在二汽的工作就涉及当时东风140的可靠性。1988年我参与过国家经委、国家机械委、国防科工委、劳动人事部、广播电影电视部和中国科协联合举办由中央电视台播出的《可靠性工程与管理》电视讲座，其中就有机械可靠性的一讲。2008年我参加了一次纺织工业协会的会议，又知道了纺织品的可靠性问题。如本书的第6章第3节介绍了故障的类别，大的原则是相通的，但在细分的类别上却是千差万别。我希望在本书改版时，能够邀请一些其他方面的专家来共同编写。

一句话，可靠性的常识亟待普及，可靠性的技术和管理水平亟待提高。本书在这两个方面都可有所贡献。

中国工程院院士

刘源张

2010年3月30日

前 言

我自 1993 年开始在中国赛宝实验室（总部）从事质量和可靠性工作，1998 年开始为企业事业单位技术和管理人员开展可靠性方面的培训，虽不是专职讲师，累计授课规模也超过 5000 人次，学员都是来自企业一线的工程技术人员和管理人员。在同他们的交流中，我强烈地感觉到，提高中国产品可靠性，最重要和紧迫的就是在工程和企业中向技术和管理人员灌输可靠性理念，讲解实际操作方法，而不是讲解高深的理论，推导复杂的数学公式。

在进行可靠性培训时，我经常将产品设计时的经验、方法用可靠性的观点、理论和方法去解释分析，很受学员欢迎。于是，我有意收集前辈和同行们在实际工作中的案例，并将它们同可靠性理论结合，进行演绎和讲解，得到了学员的认可。在本书编写过程中，对可靠性领域比较成熟的理论和方法，一般直接给出结论，避免烦琐的理论推导和论述，力求简洁明了，通俗易懂。将重点放在介绍使用方法和操作步骤，并尽量列举案例，使读者既能加深对理论的理解，又能联系实际工作案例开展相应工作。

关于书名，是受到“一个电表的故事（见 1.1 节）”启发。这个故事，使我理解了许多企业经营和质量管理者们的困惑：为什么自己的产品出厂前 100% 检验合格，而一年后，返修率却高达 10% 甚至 20%？别人的产品却只有 5% 甚至 1% 或者更低？检验质量对于我们经营、管理和技术人员的影响太深了，因为它好操作，甚至在很多企业中，检验就是质量工作的核心内容。虽然很多人接触和了解了新的质量观，但如何真正理解、实施和控制全过程的质量，似乎还没能让从事具体产品设计的人掌握其内涵，明白如何操作。例如，降低返修率，与产品的设计、生产、原材料、检验、销售、维修等都有关系，是一项可靠性系统工程。返修率高，说起来是质量问题，实际上绝大部分是可靠性问题。更具体地讲，就返修率而言，最具决定性的过程是产品设计（含原材料选型和采购）和生产，其次才是产品出厂检测（不是设计时的验证试验）。

因此，本书命名为《以可靠性为中心的质量设计、分析和控制》，强调的是“以可靠性为中心”，但不排除其他已成熟并在生产实践中有效应用的质量管理和控制技术，而且极力倡导两种技术或方法的互补共用。希望国内的同行能在阅读和使用本书的过程中创新并推广各种质量可靠性技术，将以可靠性为中心的质量设计、分析和控制技术发扬光大，提升我国产品的质量和可靠性，打造“中国制造”的质量品牌。

在本书的编写过程中，参阅了前辈和同行编写或提供的大量可靠性文献和资料，有些内容是得益于与他们的交谈心得，在此表示衷心的感谢。感谢潘勇研究员对本书提出的宝贵意见，特别感谢刘源张院士亲自为本书作序。

田宇、葵少英、彭成信、何铤、杨尚洁、周军连、王晓晗和杜鹏懿等同事参与了本书部分章节的编写、校对和制图等工作，在此一并感谢。

由于本书编写时间紧，加之作者经验和知识有限，难免有疏漏之处，敬请读者批评指正。

张增照

2010 年 5 月

目 录

第一篇 导 引 篇

第 1 章 引言	3
1.1 一个电表的故事	3
1.2 质量与可靠性	4
1.2.1 质量的内涵	4
1.2.2 质量管理的发展阶段	5
1.2.3 可靠性的内涵	7
1.2.4 可靠性工程及其主要工作项目	8
1.2.5 可靠性管理与质量管理的关系	9
1.3 为什么要以可靠性为中心	11
1.3.1 现代质量管理的要求	11
1.3.2 提高生产力水平的要求	12
1.3.3 消费者利益的要求	13
1.3.4 国家形象和企业信誉的要求	14
1.4 本书的内容编排和适用范围	14
参考文献	16

第二篇 定量分析篇

第 2 章 产品可靠性表征与寿命分布	19
2.1 产品的可靠性定义	19
2.2 产品的可靠性指标	20
2.2.1 常用的可靠性指标	20
2.2.2 产品的寿命特征量	23
2.3 可靠性指标间的相互关系	25
2.4 产品的寿命分布	26
2.5 浴盆曲线与失效率等级	31
2.6 维修度与有效度	33
第 3 章 可靠性模型的建立与分析	35
3.1 可靠性模型的组成	35
3.2 基本可靠性模型和任务可靠性模型	35
3.3 系统可靠性模型	37
3.4 建立可靠性模型的程序和原则	47

第4章 可靠性预计	51
4.1 可靠性预计的主要方法	51
4.2 可靠性预计标准的发展及其主要分类	52
4.3 元器件计数法和应力分析法可靠性预计程序	55
4.4 计数法可靠性预计	57
4.5 应力分析法的可靠性预计	61
4.6 GJB/Z299C 给出的普通双极型晶体管和集成电路预计用数据表	70
第5章 可靠性分配	76
5.1 可靠性分配考虑的因素	76
5.2 考虑复杂度和重要度的分配方法	76
5.3 按预计失效率等比例分配法	79
5.4 按系统可靠性框图进行分配的方法	80
5.5 综合因子法(工程加权法分配法, CW 法)	81
5.6 可靠性指标分配应注意的事项	82
第6章 故障模式、效应与危害性分析(FMECA)	84
6.1 故障模式、影响及危害性分析的概念	84
6.2 常用标准	86
6.3 军标 FMEA/FMECA 分析的步骤	86
6.4 QS9000 的 FMECA 方法	100
6.5 分析实例	103
第7章 故障树分析	108
7.1 故障树分析的概念	108
7.2 FTA 方法基础	108
7.3 故障树的一般方法	114
7.4 故障树分析应用实例	121
7.4.1 压力罐系统建树过程	121
7.4.2 压力罐系统的故障树规范化和模块分解	126
7.4.3 压力罐系统故障树定性分析及其应用	127
7.4.4 压力罐系统的故障树定量分析	129
参考文献	131

第三篇 设计技术篇

第8章 可靠性设计的目的及方法	135
8.1 可靠性设计的指导思想	135
8.2 可靠性、维修性指标的论证和确定	138
8.3 可靠性指标与性能指标间的相互关系	140
第9章 元器件的选用技术	142
9.1 半导体器件的选用	142
9.2 电阻器与电位器的选用	147

9.3	电容器的选用	151
9.4	电感器的选用	155
9.5	继电器的选用	156
9.6	接插件的选用	159
9.7	电缆一般应用考虑	160
第 10 章	降额设计	162
10.1	降额设计的定义与合理应用	162
10.2	降额设计的理论依据	163
10.3	降额系数的确定	165
第 11 章	容差与漂移设计	173
11.1	容差与漂移设计的概念	173
11.2	敏感度分析与极差综合法	175
11.3	漂移设计的计算机仿真	177
第 12 章	储备（冗余）设计	183
12.1	储备的含义和方式	183
12.2	各种储备方式对可靠性的提高	183
12.3	故障模式对储备的影响	187
12.4	灵活应用储备设计的例子	187
第 13 章	电路结构简化设计	190
13.1	电路集成化	190
13.2	数字逻辑电路的简化	191
13.3	模拟电路的简化	192
第 14 章	潜在通路分析	193
14.1	潜在通路分析的由来和原理	193
14.2	潜在通路的表现形式和设计预防	195
第 15 章	“三防”设计	199
15.1	防潮设计	199
15.2	霉菌的危害及防护	200
15.3	盐雾的危害及防护	201
15.4	元件三防处理常用的工艺	201
15.5	案例	202
第 16 章	热设计	205
16.1	概述	205
16.2	传热方式	206
16.3	热设计的原则	215
16.4	改善热设计的方法及示例	221
第 17 章	静电防护（ESD）	224
17.1	器件使用环境的防静电措施	224
17.2	器件使用者的防静电措施	226

17.3	器件包装、运送和储存过程中的防静电措施	228
17.4	设备上 ESD 的电路保护	228
17.5	案例	230
第 18 章	微电子器件的可靠性安装	233
18.1	引线成形与切断	233
18.2	在印制电路板上安装器件	233
18.3	焊接	236
第 19 章	防门锁设计	239
19.1	门锁的来源	239
19.2	门锁的防护	240
19.3	案例	241
第 20 章	软件质量和可靠性设计	244
20.1	软件的质量和可靠性设计	244
20.2	软件工程化	248
20.3	软件可靠性设计准则	251
	参考文献	257

第四篇 管理控制篇

第 21 章	供应商的控制	261
21.1	供应商的控制	261
21.2	对分供方或卖主的评定	261
21.3	供应商管理举例	264
第 22 章	元器件的质量与可靠性控制	268
22.1	引言	268
22.2	元器件的选用要求	269
22.3	各工程阶段电子元器件的管理与控制	273
22.4	元器件可靠性与质量等级	279
22.5	元器件的质量鉴别	288
22.6	案例	291
第 23 章	制造过程管理与统计过程控制	293
23.1	制造过程中的质量与可靠性管理	293
23.2	统计过程控制的原理	296
23.3	控制图绘制	299
第 24 章	质量闭环控制	305
24.1	引言	305
24.2	FRACAS 系统的建立	305
24.3	FRACAS 的运行	307
第 25 章	可靠性活动与评审	309
25.1	各设计阶段的可靠性活动	309

25.2 可靠性设计审查	310
25.3 可靠性大纲评审	312
参考文献	320

第五篇 试验评价篇

第 26 章 可靠性试验及其分类	323
26.1 可靠性试验的目的和分类	323
26.2 可靠性试验的计划与要求	325
26.3 可靠性试验方案及一般程序	327
第 27 章 可靠性统计试验的技术问题	329
第 28 章 可靠性测定试验	337
28.1 可靠性测定试验的方法与要点	337
28.2 可靠性测定试验的数据处理方法	338
28.3 可靠性测定试验的点估计与置信区间估计	338
28.4 指数分布的假设检验	341
第 29 章 可靠性鉴定与验收试验	342
29.1 抽样检验的基本知识	342
29.2 平均寿命抽样检验原理	346
29.3 指数分布下失效率抽样检验	349
第 30 章 可靠性筛选试验	351
30.1 可靠性筛选的目的和意义	351
30.2 常用的可靠性筛选方法	354
30.3 环境应力筛选 (ESS)	356
30.4 元器件的二次筛选	359
第 31 章 可靠性增长试验	365
31.1 概述	365
31.2 常用可靠性增长模型	366
31.3 示例	371
31.4 可靠性增长试验计划曲线	372
31.5 可靠性增长试验的跟踪与控制	374
31.6 可靠性增长试验的最终评定	375
31.7 可靠性增长试验用表	378
第 32 章 高加速寿命试验和应力筛选试验 (HALT/HASS)	381
32.1 概述	381
32.2 HALT 试验有效性的基本保障	386
32.3 HALT 试验程序	387
32.4 HASS 技术与实现过程	391
32.5 开展 HALT 和 HASS 的几点看法	396

第 33 章 寿命和加速寿命试验397

33.1 寿命试验 397

33.2 加速寿命试验398

33.3 举例404

参考文献407

第一篇 导引篇

DI YI PIAN

第 1 章 引 言

1.1 一个电表的故事

几年前，一个设计和生产电子式电度表的老板找到我，要我帮他计算一下，他能不能打出“10 年包换”的口号。我很感动，感动来自两个方面：一是这个老板很讲诚信，因为“10 年包换”行不行还要计算一下，说明他对用户负责（当然也是对自己的企业负责），对品牌和产品质量负责。看看当今的广告，“终身包换”、“零利润”、“绝不会坏”的口号不绝于耳，真正能实行的，或者说真正计算过是否可行的少之又少。另一个感动的原因是同本书的主题有关的，那就是他将保修期与可靠性联系在一起（其实国外的高质量产品，在推出前，进行保修期的分析是必需的），一种朴素的，但切中要害的以可靠性为中心的质量思维模式。

许多老板很困惑，为什么我的产品出厂前 100%检验合格，而一年后，返修率却高达 10%甚至 20%。别人的产品却只有 5%甚至 1%或者更低？于是，就拼命批评 QC 检验人员，认为检验做得不好。我去广东的一个空调厂讲授可靠性，这个厂的原质量处长告诉我，老板让他用 1 年的时间将返修率降低一半，他没做到，老板把他撤职了。他说他很冤枉，我认为他是很冤枉，因为用 1 年的时间将返修率降一半是一件大事，不单是质量处的责任，这与产品的设计、生产、原材料、检验、销售和维修等都有关系，是一项可靠性系统工程。其实，返修率高，说起来是质量问题，实际上绝大多数是可靠性问题。更具体地讲，返修率高，最具决定性的过程是产品设计（含原材料选型和采购）和生产，其次才是产品出厂检测（不是设计时的验证试验）。

要说清楚返修率同可靠性的关系，需要先谈谈可靠度。可靠度就是产品在给定的条件下和给定的时间内，完成规定功能的概率。通俗地讲是在一定时间内（如 10 年）产品不坏的比例。对于电度表，可用指数分布表征其寿命，则其可靠度为：

$$R(t) = e^{-\lambda t} = e^{-\frac{t}{\text{MTBF}}} \quad (1-1)$$

式中， R ——可靠度；

λ ——失效率，单位为/h；

MTBF——平均寿命（或称平均故障间隔时间），单位为 h，对于指数分布 $\text{MTBF} = 1/\lambda$ ；

t ——任务时间，实际就是产品工作时间，单位为 h。

对于本例，电度表安装后，即连续工作，所以，10 年包换就是要它连续工作 10 年（合 87 600 小时）。

若按式（1-1）计算得 $R(10 \text{ 年}) = 0.6$ ，这意味着，到第 10 年时，有 40%的产品已经发生故障（需维修或报废），即“10 年包换”要换掉 40%的产品，这显然是不能接受的；如果 $R(10 \text{ 年}) = 0.95$ ，这意味着，到第 10 年时，有 5%的产品已经发生故障（需维修或报

废)，即“10 年包换”要换掉 5%的产品，这显然是可以接受的。如果强调每年的返修率，实际上是对 λ 的要求，用式（1-1）可推出同样的结果。

当然，大家都希望 $R(10\text{ 年})$ 越大越好，从式（1-1）可以看出，这必须降低失效率 λ ，也就是提高产品的 MTBF。

要提高产品的 MTBF，必须开展一系列的工作，如控制原材料采购，开展可靠性设计，可靠性预计，故障模式影响及危害性分析（FMEA），故障树分析（FTA），建立故障报告，分析和纠正措施系统（FRACAS），利用因果树、排列图和直方图等质量工具，改进产品设计和生产的各个环节。

另一方面，产品的返修率高，直接的影响是产品返修造成的经济损失，更深层的影响是降低了客户满意度，损害了企业品牌。这个电度表的例子可以推广到其他产品，从中可以得到有益的启示，开展以可靠性为中心的质量设计、分析和控制，是提高产品质量最核心的内容、最直接的途径和最实际的办法。

1.2 质量与可靠性

1.2.1 质量的内涵

随着科学技术的发展，质量的概念也发生着变化，人们在不同的时期，从不同的角度，对质量给出了不同的定义。

1. 日本的质量管理学家田口玄一（Taguchi）定义

质量就是产品上市后给社会造成的损失，既包括直接损失，如空气污染、噪声污染与化学泄漏等，又包括间接损失，如顾客对产品的不满意，以及由此导致的市场和销售损失和保险费用的增加等，但由于产品功能本身产生的损失除外。田口博士认为产品上市后给社会造成的损失的大小能直接反映产品质量的高低，并据此提出了质量损失函数（Quality Loss Function）的概念：质量损失越小，产品质量越好；反之，产品质量越差。将质量与经济性紧密结合在一起，是田口博士对质量管理研究的重大贡献之一。

2. 美国质量管理专家朱兰博士（J. M. Juran）定义

质量就是适用性（Fitness for Use）。显然，他是从用户的角度出发，更加强调产品或服务必须满足用户的需求。一个组织只有为顾客增加价值才能够成功。顾客对价值的定义为：感知的质量/感知的价值。也就是说，质量是产品质量、服务质量和印象的结合体。只有将这三者融合好了，才能够成功。

3. 国家标准及国际标准 ISO9000 的规定

质量就是一组满足要求程度的固有特性。“固有的”就是指存在于某事或某物中的，尤其是那种永久的特性。质量是有关产品、过程或体系中客观存在的某些永久的特性，如物理特性和感官特性，而人们赋予的特性，如产品价格就不是质量。质量体现了满足要求的程度，而“要求”不仅是指合同、法律法规等明确规定，即明示的要求，而且还指隐含的、不言而喻的惯例或一般习惯要求。质量的对象主要是产品、过程和体系。

4. 刘源张院士在 1999 年提出的定义

质量是个既老又新的问题；产品质量（包括服务）是创造和提供产品及与此有关的整体工作的质量的结果；产品质量变动的原因主要来自五个方面：生产者、消费者、市场、国家政策（对产品、工作、生活、环境、资源的立法和执法）和科学技术。刘源张院士在 2004 年 7 月又提出，要从生产者，同时也要从消费者角度，从符合性、适用性和价值性来认识和研究质量；这三者各有不同的内容，符合性是指符合可持续发展的要求，适用性不仅指对用户的适用程度，而且包括对环境的友好程度；价值性不仅是价值与使用价值的一致性，而是更进一步注意创造的产品价值与损耗的社会价值的比较；需要对消费者进行教育和说服。刘源张院士强调质量的本质问题是变动性，其变动的原因主要来自生产者和消费者等多个方面，要把质量与可持续发展联系，从更多的评判元素和更大的社会、自然环境系统中认识质量。

由于角度不同，对质量含义的理解和界定就存在很大的差异。定义 1 和定义 2 分别从社会和使用产品的用户的角度理解质量。相对而言，定义 3 比较全面，定义中的实体不只局限于产品，而是几乎覆盖了质量管理和控制、保证等活动中可能涉及的所有对象。刘源张院士对质量的理解强调了质量是社会经济技术各种因素共同作用的结果，应当把质量作为更大的社会系统的子系统进行研究，突出了系统、宏观和发展的质量管理基本理念。

1.2.2 质量管理的发展阶段

质量管理与经济发展和科技进步密切相关，它受到政治、经济、科技、文化和自然环境等社会要素的推动和制约，并与其同步发展。质量管理的发展经历了三个发展阶段：质量检验阶段（Quality Test, QT）、统计质量控制阶段（Statistical Quality Control, SQC）和全面质量管理阶段（Total Quality Management, TQM），如图 1-1 所示。



图 1-1 质量管理的发展阶段

1. 质量检验阶段

这一阶段大约从 20 世纪初到 20 世纪 30 年代末，其理论依据是美国工程师泰勒（F. W. Taylor）提出的科学管理理论。这一阶段的特点是以事后检验为主，只能在事后被动地进行