

质量工程学丛书

质量工程学

中国兵器工业质量管理协会 编

北京理工大学出版社

前 言

质量工程学(“田口方法”)的创始人田口玄一博士,是日本著名的质量管理专家,数理统计应用技术方面的著名学者。现任日本规格协会、中部质量管理协会、丰田汽车公司顾问,戴明奖获得者。

“田口方法”包含四大技术:线外质量控制;线内质量控制;计量管理技术和试验设计技术。

“田口方法”提出了质量损失函数的概念,把质量和经济两个范畴的概念统一起来,为质量波动的定量统计分析创造了前提。

“田口方法”提出了信噪比(SN比)试验设计,为试验设计技术充实了新的内容,为解决产品或生产过程的动态特性、稳健性以及测量误差等问题开辟了新途径。

“田口方法”提出了在新产品开发过程中进行三段设计(即系统设计、参数设计、容差设计)的思想,系统地考虑问题,选择参数间的最优水平组合,以及最恰当的容差。

“田口方法”既重视经济效益,又不等于经济学;既运用数理统计方法,又不完全以统计观点来研究质量管理。“田口方法”以工程学和技术观点研究质量管理理论和方法,是一种通用性和边缘性新技术。因此,又称为“质量工程学”。“田口方法”在日本电子、化工、钢铁、纺织、汽车等工业,都得到广泛应用,产生了巨大的经济效益。当前,世界上越来越多的国家在学习应用这种方法。

1985年4月，原兵器部在“保军转民”的新形势下，为了开发民品，提高产品质量，中国兵器工业质量管理协会邀请田口先生来华讲学，系统地讲授了“田口方法”的基本理论和方法。同时，成立了“田口方法研究小组”（现改为“田口方法应用研究学术委员会”）。中国兵器工业质量管理协会致力于推广田口方法，从1985年至今，每年都举行一次“田口方法”研讨会和应用成果发表会，并邀请田口先生来华讲学，进行现场咨询。兵器工业推广应用“田口方法”逐年深入，至今已取得应用成果100多项，取得可计算的经济效益达1000多万元。同时，培养出一批推广应用“田口方法”的骨干力量，为“田口方法”在中国的广泛应用，正发挥着积极的作用。1990年5月中国兵器工业质量管理协会应日本规格协会的邀请，组团到日本参加了“田口方法”应用成果发表会，参加发表论文三篇，受到田口先生及到会专家的好评。

中国兵器工业质量管理协会，为“田口方法”在中国的推广应用，作出巨大努力，干了许多有益的工作。我们先后翻译出版了田口先生的《开发、设计阶段的质量工程学》、《实验设计法概论》两本书。编印了《兵器工业应用田口方法实例汇编》和其他一些自编教材。在总结兵器工业推广应用“田口方法”多年经验的基础上，为更好地引导企业普及、深化应用“田口方法”，满足广大企业对科技人员进行质量管理培训办班的需要，中国兵器工业质量管理协会组织了几位应用“田口方法”的专家、教授，编着了这本《质量工程学》。

这本作为质量工程学系列丛书之一的《质量工程学》，在内容上更加系统、更加丰富，更加适合中国的特点。本书不仅概括了田口先生在质量工程学方面的全部思想，而且列举了大量兵器工业应用“田口方法”的实例。本书由浅入深，对

已初步掌握概率统计基本知识的工程技术人员学习“田口方法”是一本实用的教材。

本书第一章、第十三章由华东工学院章谓基教授编写；第二章、第五章由213所惠宁利工程师编写；第三章、第四章由304厂姚吉庆工程师编写；第六章、第七章由沈阳工学院曾凤章副教授编写；第八章、第十一章、第十二章由北京理工大学严圣武教授编写；第九章、第十章由华东工学院韩之俊副教授编写；第十四章、第十五章由617厂魏林工程师编写。

中国兵器工业质量管理协会质量工程学丛书编审委员会，今后将陆续翻译出版田口先生的近作，继续编著教材，出版“田口方法”实用手册和应用软件，把“田口方法”的学习、应用提高到一个新水平。

由于时间仓促，水平有限，书中缺点和错误在所难免，恳请读者批评指正。

质量工程学丛书编审委员会

目 录

第一章 概 论

§ 1 产品的质量	1
§ 2 线外与线内质量工程学	13
习 题	22

第二章 质量损失函数

§ 1 望目特性的质量损失函数	23
§ 2 望小特性的质量损失函数	31
§ 3 望大特性的质量损失函数	33
§ 4 百分率质量特性的质量损失函数	34
§ 5 动态特性的质量损失函数	34
习 题	35

第三章 容差的确定

§ 1 由功能界限确定容差	36
§ 2 下位特性容差的确定	38
§ 3 老化特性容差的确定	40
§ 4 综合情况下容差的确定	43
习 题	45

第四章 容差设计

§ 1 望目特性、望小特性的容差设计	47
§ 2 望大特性的容差设计	63
习 题	65

第五章 望目特性的三次设计

§ 1 概述	67
§ 2 内外表直积法 (可计算的场合)	70
§ 3 综合误差因素法 (不可计算的场合)	90

§ 4 小结	100
习 题	102
第六章 望小特性的参数设计	
§ 1 望小特性的信噪比	103
§ 2 望小特性的参数设计	104
习 题	113
第七章 望大特性的参数设计	
§ 1 望大特性的信噪比	115
§ 2 望大特性的参数设计	116
习 题	122
第八章 计数分类特性的参数设计	
§ 1 计数分类值	123
§ 2 分等评分的试验设计	124
§ 3 零件的寿命试验	130
习 题	143
第九章 动态特性及信噪比	
§ 1 动态特性的概念	147
§ 2 动态特性的信噪比	149
§ 3 信号因素真值已知时, 信噪比的估算公式	152
§ 4 信号因素真值未知时, 信噪比的估算公式	166
习 题	175
第十章 计量值动态特性的参数设计	
§ 1 主动型动态特性的参数设计 ——汽车操纵特性的参数设计	177
§ 2 被动型动态特性的参数设计 ——声压计测系统的参数设计	185
习 题	191
第十一章 数字系统的参数设计	
§ 1 数字系统	196
§ 2 单一动作系统	198

§ 3 双重动作系统	201
§ 4 标准信噪比	203
§ 5 数字信息系统的试验	206
§ 6 成分分离的试验	210
习 题	216
第十二章 多指标时的参数设计	
§ 1 综合信噪比法	218
§ 2 综合平衡法	224
习 题	232
第十三章 线内质量工程学简介	
§ 1 质量反馈控制系统	237
§ 2 工序的诊断与调整	239
§ 3 工序诊断、调整参数的优化	250
习 题	259
第十四章 波动平方和及其分解	
§ 1 单个总体的情形	261
§ 2 单因素试验的情形	264
§ 3 多因素试验的情形	273
§ 4 回归分析的情形	279
习 题	293
第十五章 正交试验设计	
§ 1 正交表及其选用	296
§ 2 正交试验的波动平方和分解	305
§ 3 正交试验设计实例	309
习 题	315
参考文献	

第一章 概 论

§1 产品的质量

1.1 两种产品质量水平的比较

设甲、乙两厂生产相同设计的彩色电视机，甲厂的产品约有千分之三的不合格品，乙厂的产品全都是合格品，但许多人却喜欢购置甲厂生产的电视机。这是什么原因？田口玄一博士用质量工程学观点对两厂的管理思想和管理方法作了分析，就可得到结论。

1. 从产品质量特性值的分布作分析

现以彩电的一项重要的质量指标色彩浓度为例。设目标值为 m ，容差为 Δ ，公差范围为 $[m-\Delta, m+\Delta]$ 。

在质量管理中，将公差 2Δ 除以工序能力 6σ ，其商称为工序能力指数，记作 C_p ，即

$$C_p = \frac{2\Delta}{6\sigma}$$

甲厂生产的电视机色彩浓度分布如图 1-1 中实线所示。质量特性值 y_1 服从正态分布 $N(m, \sigma_1^2)$ ，它以目标值 m 为中心，其标准差 $\sigma_1 = \Delta/3$ 。

因此，甲厂生产的电视机的色彩浓度的工序能力指数 C_{p1} 为

$$C_{p1} = \frac{2\Delta}{6 \times \Delta/3} = 1$$

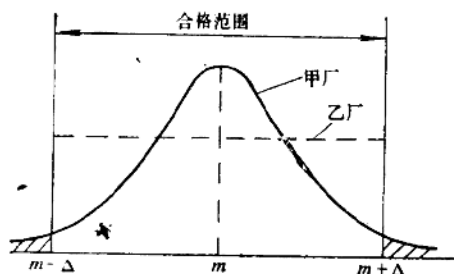


图1-1 甲、乙两厂色彩浓度分布的比较

乙厂生产的电视机色彩浓度分布如图 1-1 中虚线所示。质量特性值 y_2 在区间 $[m-\Delta, m+\Delta]$ 中服从均匀分布。这是由于乙厂在工序控制中采用量规检查，故特性值呈均匀分布。均匀分布的标准差 σ_2 为

$$\sigma_2 = \frac{2\Delta}{\sqrt{12}} = \frac{\Delta}{\sqrt{3}}$$

因此，工厂生产的电视机色彩浓度的工序能力指数为

$$C_{p2} = \frac{2\Delta}{6 \times \Delta/\sqrt{3}} \approx 0.58$$

可见， C_{p1} 大于 C_{p2} ，这说明甲厂产品的质量水平比乙厂产品要好。

如果我们采用评分法，把产品分成优、良、合格和不合格品四个等级，规定 ($i=1, 2$)

当 $|y_i - m| \leq \Delta/3$ 时，产品为优品，评为5分；

当 $\frac{\Delta}{3} < |y_i - m| \leq 2\Delta/3$ 时，产品为良品，评为4分；

当 $\frac{2\Delta}{3} < |y_i - m| \leq \Delta$ 时，产品为合格品，评为3分；

当 $|y_i - m| > \Delta$ ，产品为不合格品，评为2分。

从图1-1中可见，甲厂的产品优品多（占68.3%），良品次之（占27.2%），合格品较少（占4.2%），而不合格品微乎其微（只占0.3%）。而乙厂的产品优品、良品和合格品各占1/3。我们可以算出两厂产品的平均得分，分别为

$$\bar{y}_1 = 5 \times 0.683 + 4 \times 0.272 + 3 \times 0.042 + 2 \times 0.003 = 4.6 \text{ (分)}$$

$$\bar{y}_2 = 5 \times 1/3 + 4 \times 1/3 + 3 \times 1/3 = 4 \text{ (分)}$$

可见，甲厂产品的平均得分比乙厂产品高0.6分。因此从整体看，甲厂产品的质量水平超过乙厂。

2. 从质量管理思想作分析

乙厂采用美国休哈特博士的质量管理方法，主要有两条：

(1) 重视检验，强调检验部门把关，不让不合格品出厂。

(2) 采用休哈特控制图进行工序控制。

乙厂的质量管理通常只能控制产品质量，而不能真正改进产品质量。

甲厂采用日本田口玄一博士的质量工程学进行产品设计和工序控制，主要的也有两条：

(1) 采用线外质量工程学（或称三次设计）来提高产品设计质量，使得产品质量高、成本低，性能稳定可靠，竞争力强。

(2) 采用线内质量工程学对生产工序进行控制，它不同于休哈特控制图。它的主要思想是使得工序中生产出来的产品质量特性值尽量与目标值一致。因此产品的质量特性值呈正态分布，且工序能力指数高。同时，它把质量与成本联系

起来,寻找使损失最少的最佳管理方式,从而改进产品质量。

我们知道,产品的质量主要通过以下三个阶段

设计→制造→检验

逐步形成的。早期传统的质量管理只抓产品检验。休哈特博士提出“产品质量不是检验出来的,而是生产制造出来的”,自休哈特控制图问世后,把质量管理从检验阶段延伸到生产制造阶段,进行工序控制。乙厂的质量管理主要抓检验和工序控制。而田口博士提出“产品质量首先是设计出来的,其次才是制造出来的”。他把质量管理又向前推进了一步,强调要首先抓好产品设计阶段的质量管理。并提出“源流管理”的思想,认为设计阶段是源流,是上游,制造和检验阶段是下游,他认为:“抓好上游管理,下游管理就很容易”,“只抓下游管理,不是好的管理方法”。也就是说,质量管理首先要抓好源流管理,重视产品设计阶段的质量管理,设计出质量高、成本低的产品来。

由于甲厂采用田口博士的线外和线内质量工程学方法,抓好源流管理,使得该厂生产的彩电质量从整体上超过乙厂,这是甲厂产品占领市场的主要原因之一。

1.2 产品质量的定义

对于产品的质量,通常认为质量是产品、过程或服务满足规定或潜在要求(或需要)的特征和特性的总和。“需要”包括可用性、安全性、有效性、可靠性、可维修性、经济性和环境等几个方面。如果产品或服务满足用户需要的程度越好,则其质量也越高。

田口博士对产品质量给出了新的定义,他提出:“所谓质量,是指产品上市后给予社会带来的损失。但是,由于功

能本身所产生的损失除外”。他把产品质量与经济损失联系在一起,在上市后给社会带来损失小的产品,就是高质量的;而给社会带来损失大的产品,就是低质量的。这个定义既保存了“满足规定或潜在要求(或需要)”这个产品质量的中心内容,又强调了经济效果。

在理解田口博士关于产品质量的定义时,要注意以下几点:

(1) 定义中的“社会”系指除生产厂家以外的所有的人。具体地讲,是指使用者以及在使用过程中与产品有关的人。例如对“汽车”来讲,“社会”的含义包括用户及在使用过程中汽车的废气、汽车的车祸等对人们的影响。

(2) 定义中“给予社会带来的损失”,包括以下两个方面。一是由于产品功能(即质量特性)波动所造成的损失;二是由于产品弊害项目所造成的损失。

例如,某厂生产的电动机,如果不管在什么环境条件下,使用多年后,仍能几乎以同一速度转动,那么它就是功能波动小、质量高的电动机。但如果该电动机的振动、噪声增大,那么对与功能(转动速度)无关的弊害项目来说,就成为质量不高的电动机。总之,所谓质量高的产品,应该是其本身的功能波动小,并且包括成本等在内的弊害项目损失小的产品。如果说,成本管理是为了减少产品上市前所产生的各种损失的对策,那么质量管理就是为了减少产品上市后给予社会带来的上述两种损失的对策。

(3) 定义中给社会带来的损失,不包括“功能本身所产生的损失”。

关于功能本身给社会以怎样的损失,以及如何减少其损失,这不属质量管理的内容。例如,酒具有醇香醉人的功

能，因为喝酒致醉造成的各类事故，由此引起的社会损失，就不在上述质量损失内容之中。如果改变酒的功能，酿制喝不醉的酒，这不会被人们所接受。社会到底允许产品具有何种功能，这是文化和法律问题，而不是质量管理问题。

实际上，田口博士将产品质量定义为产品上市后所产生的三部分损失之和：

$$(\text{质量}) = (\text{功能波动的损失}) + (\text{使用成本}) + (\text{弊害项目的损失})$$

例如考察电动机的转速。设规定其目标值 $m = 1000$ 转/分。如果电动机转速达不到 1000 转/分，产生了功能波动，可以用第二章 § 2 中介绍的方法计算由于功能波动所造成的损失。使用成本为单位时间的耗电费。弊害项目是电动机工作时的振动和噪声，可根据环境保护条例中的一些规定来计算由于振动和噪声造成的损失。在这三项损失中，我们的重点是第一项，要设法评价由于功能波动造成的损失，并设法减少这个损失。因此，提高产品质量的关键在于减少由于功能波动所引起的社会损失。

另外，成本为产品出厂前所需要的生产费用，它等于四部分之和：

$$(\text{成本}) = (\text{材料费}) + (\text{加工费}) + (\text{管理费}) + (\text{弊害项目的损失})$$

上式中的弊害项目是指生产中对工人有危害的项目，例如污染、噪声及安全性等。

我们将质量与成本之和称为产品的总损失，即

$$(\text{总损失}) = (\text{质量}) + (\text{成本})$$

设计产品的目标是使总损失最小，也就是要提高质量（减少质量损失）和降低成本。

二次大战前，日本的产品“价廉质差”，即成本低质量差，总损失较大，所以没有竞争力。二次大战后，日本主要生产“价高质好”的产品，由于成本高，总损失仍较大，所以也没有竞争力。

田口博士提倡设计和生产出“价廉物美”的产品，即成本低质量高，总损失达到最小，只有这样的产品才具有竞争力。

降低总损失的关键是在不增加成本的基础上减少功能的波动。不计成本，片面强调提高质量，生产“价高质好”的产品，不是产品设计的方向。只有当成本控制在某个数值之下，改进质量才成为必要的、有意义的。

1.3 品种与质量的区别

在理解什么是产品的质量时，还必须区分品种和质量。例如，裙子有蓝色的、红色的；有百叶裙、旗袍裙；有短裙、长裙等各种款式和不同的规格。这些都是不同的品种，而不是不同的质量。不能因为今年市场上畅销红色，就认为红色的质量比蓝色的好。衣服的颜色、款式等都是品种问题。如何进行品种设计、规定价格等属于产品规划问题。在决定品种后，品种本身并没有索赔权，也没有产品责任问题。这是因为颜色、款式、尺码、价格等都是消费者在知道其情况下购买的。

如果买来的一条裙子，很快就脱线，一洗就褪色，在洗涤后裙子的缩水很大，功能产生了波动，这些都属于质量问题。出了质量事故，用户就会要求索赔，并且不会再买第二次。这样一来，在产品研制、生产制造、市场开拓等方面耗费的许多努力和巨额资金就浪费了。品种和价格在购买时就

知道，但多数质量问题是在使用以后才暴露出来的。为了保证产品质量，必须在产品设计和制造过程中加强质量意识，使得产品在质量方面具有充分的竞争能力。田口博士创立的线外、线内质量工程学正是提高产品质量的重要方法。

了解品种与质量的区别后，正确对待品种与质量的态度是“增加品种和提高质量”，这是企业赖以生存和发展的最重要决策。当然，不能盲目地增加品种，它需要在市场调查的基础上，使品种“适销对路”。

1.4 质量特性及其分类

质量特性又称输出特性，采用哪种质量特性来反映产品的质量状况，这是专业技术问题。而选取什么性质的质量特性以及有效的分析方法，则是质量工程学的任务。要想正确选取质量特性，首先需要了解质量特性的分类。

质量特性可分为计量和计数两大类。计量特性又可分为望目、望小和望大特性三种类型。计数特性可分为计件特性和计点特性两类。质量特性还可根据产品质量形成的各个阶段（位置）的前后分为下位特性和上位特性。

1. 计量特性与计数特性

当质量特性可以选取给定范围内任何一个可能的数值时，称为计量特性。对用各种计量仪器测量的数据，如长度、重量、时间、寿命、强度、温度、化学成分含量等都是计量特性。通常可以认为计量特性服从正态分布 $N(\mu, \sigma^2)$ ，其中 μ 是均值， σ^2 是方差。

当质量特性只能一个一个地计数时，称为计数特性。计数特性又可分为计件特性和计点特性。

计件特性是指对单位产品进行按件检查时所产生的属性

数据,如判定产品为合格品或不合格品,它只取0或1两个数值。对于 n 件产品中的不合格品数,它取值为0,1,2, ..., n ,可以认为它服从二项式分布 $B(n, p)$,其中 n 为产品个数, p 为批不合格品率。

计点特性是指单位产品上质量缺陷的个数,它取值0,1,2, ..., 可以认为它服从泊松分布 $P(\lambda)$,其中 λ 为平均缺陷数。如棉布上的斑点数、铸件上的砂眼数等均为计点特性。

2. 望目、望小和望大特性

计量特性可以进一步分为望目、望小和望大特性。

望目特性:存在目标值 m ,希望质量特性 y 围绕目标值 m 波动,且波动越小越好。

例如按图纸规定 $\phi 10^{+0.05}$ 加工某种零件,则零件的实际尺寸 y 就是望目特性,其目标值 $m=10(mm)$ 。

望小特性:不取负值,希望质量特性 y 越小越好,且波动越小越好。

例如零件摩擦表面的磨损量,测量误差,化学制品的杂质含量,轴套类机械零件的不圆度、不同轴度等均为望小特性。

望大特性:不取负值,希望质量特性 y 越大越好,且波动越小越好。

例如机械零件的强度,弹簧的寿命,塑料制品的可塑性等均为望大特性。

3. 上位特性和下位特性

产品质量形成的全部过程包括下列阶段:市场调研;设计和研制;采购;工艺准备;生产制造;检验和试验;包装和贮存;销售和发运;安装和运行;技术服务和维护;用后处置。

在每一阶段都存在质量特性。一般来说,位于前面阶段的

是原因特性,称为下位特性;而位于后面阶段的是结果特性,称为上位特性。例如在销售和发运阶段,产品的质量特性是上位特性,而在工艺准备阶段中零件的质量特性是下位特性。

1.5 功能波动

产品的功能(质量特性) y 不仅与目标值 m 之间可能会存在差异,而且由于来自使用环境、时间因素以及生产时各种条件等多方面的影响使得产品的功能发生波动,从而引起质量损失。为了减少产品的功能波动,进而减少波动造成的损失,必须分析产生功能波动的原因,以便采取正确有效的对策。影响产品功能波动的原因大致可以分为以下三种类型。

1. 外干扰(外噪声)

在使用产品时,其使用环境并非固定不变。由于使用条件及环境条件(如温度、湿度、位置、输入电压、磁场、操作者等)的波动或变化,将引起产品功能的波动。我们称这种使用条件和环境条件的波动为外干扰,也称为外噪声。

例如手表运行快慢随着温度的变化而波动;彩色电视机的清晰度与输入电压的大小有密切的关系。

2. 内干扰(内噪声)

产品在贮存或使用过程中,随着时间的推移,发生材料变质等老化现象,从而影响产品的功能波动。我们称这种产品的老化现象为内干扰,也称为内噪声。

例如长时间进行贮存的产品,当开始使用时,构成该产品的材料、元件随着时间的推移将产生质的变化,从而引起产品的功能波动。如某种电阻的阻值在贮存10年后,比初始