



中国质量协会
CHINA ASSOCIATION
FOR QUALITY

卓越质量丛书

主编 马林

稳健性设计

原理 技术 方法 案例

Robust Design

曾凤章 编著

兵器工业出版社

稳健性设计

原理 技术 方法 案例

曾凤章 编著

兵器工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

稳健性设计 原理 技术 方法 案例/曾凤章编著.
2版. —北京:兵器工业出版社,2004.6

ISBN 7-80172-255-8

I. 稳... II. 曾... III. 质量管理—稳健性—设计
IV. F273.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 052024 号

出版发行:兵器工业出版社

责任编辑:莫丽珠

邮编社址:100089 北京市海淀区车道沟10号

经 销:各地新华书店

印 刷:首钢总公司印刷厂

版 次:2004年6月第2版第1次印刷

印 数:1—2050

封面设计:李 晖

责任校对:郭 芳

责任印制:王京华

开 本:850×1168 1/32

印 张:12.375

字 数:320千字

定 价:25.00元

(版权所有 翻印必究 印装有误 负责调换)

总 序

为了适应当今世界技术经济迅猛发展,全球经济一体化及国际市场竞争日益激烈的形势,企业都在寻求在全球化、信息化环境中立于不败之地的管理模式。世界级企业的巨大成功已经证明:集成了管理发展史上先进质量理念和管理方法的六西格玛管理是企业追求卓越质量的有效管理模式和战略选择。然而,在六西格玛管理的技术方法集合中,作为稳健性设计的核心技术——田口方法无疑是最经济、最快捷开发顶级质量和可靠性产品的最有效途径。

田口方法是日本田口玄一博士于二十世纪70年代初期创立的质量工程新技术,是当代最新颖、科学、有效的稳健性优化设计方法体系,它不仅为人们提出了质量设计的新概念和新思维,而且提供了高效益(低成本)、高效率、高稳健性、高再现性的产品设计及技术开发的方法和技术。随着田口方法的应用及推广,其先进性、通用性和有效性已逐渐被人们所认识。

1 质量设计的稳健性和再现性——实现零缺陷的根本

六西格玛管理追求的目标是产品和过程的零缺陷。产品 and 工艺的设计质量是质量形成的核心,是质量控制与改进的先决条件。从一开始就把产品和工艺流程设计好,是实现零缺陷的基础。

田口方法将传统的设计程序改为按三个阶段定量优化的方法,简称三次设计——系统设计、参数设计和容差设计。其中参数设计的基本设计思想是:不同的设计方案即不同的可控因素水平(参数组合),其输出质量特性期望值(μ)和波动性(σ^2)均不同。参数设计的任务是利用质量特性与参数组合之间的非线性效应,找出功

性能最好的参数组合值,使设计的产品和工艺 $\mu=m$ (目标值),且 $\sigma^2=\min$ 。同时,田口方法通过与以往试验设计不同的、独特的手法和技巧,使在试验室有限条件下设计的产品和开发的技术可适用未知条件在内的大规模生产或与试验室有很大差别的各种市场条件。因此,田口方法同时实现了设计与技术开发的稳健性和再现性。

2 抵制噪声(干扰)——提高产品的可靠性的有效途径

田口方法将造成输出功能波动的原因分为三类:外噪声(使用条件和环境的干扰)、内噪声(材料、元器件随时间老化、劣化的干扰)、产品间噪声(制造过程中 5M1E 因素造成的输出特性差异)。在三种噪声的综合作用下,输出特性表现为随机变量。技术或产品输出特性对上述三种噪声极不敏感的性质称为稳健性。

以往的试验设计目的通常是寻求一组可控因素的最佳搭配,使其输出特性期望值达到目标值,即 $\mu=m$ 。但达不到稳健性设计的目的。

与以往的试验设计不同,田口方法采用误差因素来模拟客观存在的噪声影响,通过对各试验数据的统计分析,找出抗干扰能力最强的、最稳健的可控因素水平组合。

可靠性的实质是反映产品性能对时间因素和环境因素造成的波动的抵制能力。这种能力越强,产品的可靠性越高、平均寿命越长。田口方法的目的恰恰是增强产品对内噪声和外噪声的抵抗能力,从而降低产品输出特性的波动。因此,田口方法无疑是提高产品可靠性的有效方法。

3 田口式的技术开发——高效率的开发技术

田口方法认为:质量的改善应尽可能追溯到源游阶段,把考虑问题的重点放在技术开发是缩短产品研制周期、降低研制成本、获得高质量、高可靠性产品的根本途径。采用田口方法动态特性的参数设计方法,可开发出具有广泛应用价值的技术,即新一代产品(工艺)和更新一代产品(工艺)都能应用的技术。这种技术一旦开

发成功,在同类新产品和新工艺的研制中,只需通过调整,便可完成对产品规划确定的系列产品(或设计原理相同的产品)和工艺的参数设计任务。因此,田口式的技术开发是一种高效率的开发方法,极其适用于当今时代多品种、小批量的生产组织形式。

近半个世纪以来,田口方法不断完善和发展。由静态特性的稳健性设计发展到动态特性的稳健性设计,由稳健性产品设计发展到稳健性技术开发,由对目标功能的研究发展到对基本功能的研究,由工艺或产品的单项稳健性开发发展到工艺与产品并行稳健性开发。研究的方法和技术手段愈来愈简化、巧妙,思维方式也愈来愈具有哲理性。

自二十世纪末,田口方法的应用不仅由工业界发展到生物研究等领域,同时由硬件的功能性评价发展为软件功能性评价,将 SN 比与 Mahalanobis 距离相结合(马田系统)应用于模式识别系统。

田口方法的实用范围越来越广泛,其有效性也越来越显著。实践表明:稳健性是对产品设计方案评价和选择的第一准则,而田口方法是实施稳健性的最有效途径;田口方法是一种高质量、高可靠性、高效率的质量设计方法体系。

田口方法于 1980 年引入中国,并首先在机械工业得到研究与应用,自 1985 年国防科技工业大力推广应用田口方法,已取得具有显著成效的案例近 300 项。随着六西格玛管理在中国的推进和追求卓越质量观念的不断形成,田口方法的应用研究与推广必将会提高到一个新的水平。

本书以大量案例阐述了田口稳健性设计的原理、技术和方法。对企业掌握田口方法并将其应用六西格玛设计和六西格玛改进会大有帮助。

中国质量协会副会长兼秘书长

2004 年 7 月

前 言

稳健性设计(Robust Design)又称健壮设计或鲁棒设计。它是一种科学、高效的工程优化设计方法体系,是质量工程的核心技术。稳健性设计不仅为人们提出了质量设计的新概念和新思维,而且提供了低成本、高效率、高稳健性、高再现性的产品设计及技术开发的方法和技术。稳健性设计已在日本、美国等技术先进国家得到广泛应用和推广;ROBUST作为一种时尚的口号已成为产品质量可靠、值得信赖和可以放心购买的标志。

田口方法(Taguchi Methods)是当代日本著名学者田口玄一博士于20世纪70年代初期创立的质量工程新技术。它是一种最新颖、科学、有效的稳健性优化设计方法,是稳健性设计的主要技术。

田口方法的基本思想是:用正交表安排试验方案,以误差因素模拟造成产品质量波动的各种干扰,以信噪比作为衡量产品质量稳健性的指标,通过对各种试验方案的统计分析,找出抗干扰能力最强、调整性最好、性能最稳定、可靠的设计方案,并以质量损失最小为原则,合理地确定参数的容差,以达到成本最低、质量最优的技术经济综合效果。

田口方法不仅可应用于工艺设计、产品设计,还可应用于计量测试和技术开发。自20世纪末,田口方法的应用已由工业界发展到生物研究领域,同时由硬件的功能性评价发展到软件的功能性评价,将SN比与Mahalanobis距离相结合(马田系统)应用于模式识别系统。

田口方法的最大特点是将质量管理与经济效益联系在一起,运用数学方法,从工程观点、技术观点和经济观点对质量管理的理

论和方法进行综合研究,从而形成了一套独具特色的、有效性、通用性、边缘性极强的质量设计和质量评价方法体系。

本书以田口方法为主要内容,并扼要介绍了田口方法配套技术、稳健性设计方法体系的顶层步骤和先导程序——质量功能展开(Quality Function Deployment—QFD),并将层次分析法(AHP)引入QFD,用于确定顾客需求重要度及顾客需求、工程措施的关系度。

本书列举了大量案例,力求从工程的角度阐明田口方法的基本理论、基本思想以及应用方法和程序,使本书既可作为工科院校学生和对工程技术人员进行继续教育的教材,又可作为方便参考的工具书。

本书在编写过程中得到北京理工大学严圣武教授的多方指教,他在百忙中审阅了全书。我的学生曾江辉、崔丽、王元华、王秀村、张晓甦、张丽红和宗鹏等人也给予了极大的支持和帮助,在此一并表示感谢。

由于作者水平有限,缺点和错误在所难免,恳请读者批评指正。

作 者

2004. 6. 30

绪 论

1. 质量工程及其特点

质量工程(Quality Engineering——QE)是西方先进工业国家为适应当代高技术产业迅猛发展和国际市场空前激烈竞争的新形势,在全面质量管理基础上,广泛吸收现代科学和工程技术成果而发展起来的质量管理和质量保证的先进方法体系,目前已在世界范围内迅速推广。

(1)质量工程的产生背景

随着当代技术经济的迅猛发展,质量的地位与日俱增。质量与质量管理的内涵在不断深化,人们对质量和质量管理的认识也不断有所突破。质量概念的每一次飞跃都极大地促进了产品质量的提高和生产力的发展。

自20世纪70年代以来,由于世界范围内高技术产业的兴起和社会生产力的迅速发展,国际市场竞争的焦点开始由价格的竞争转向质量的竞争;以生产阶段为主的质量控制开始延伸到设计阶段和售后服务阶段的质量控制。国际市场日益激烈的竞争形势使人们越来越深刻地认识到:质量是产品形成全过程的产物,设计阶段是产品固有质量形成的关键阶段,售后服务质量是质量管理的重要方面。在这种质量管理新形势的驱动下,日本、美国等经济发达国家,开始出现了许多新思维、新概念和新技术。

20世纪70年代,具有思考性的新质量控制(QC)七种工具、质量功能展开(QFD)、田口方法等在日本应运而生。这些方法的

核心内容是对顾客需求的分析、保证手段以及设计阶段的质量保证技术。

20世纪80年代以来,产品质量和市场竞争的严峻形势给美国带来的危机迫使企业重新考虑其经营战略。工业界的质量意识空前提高,并制定了以顾客需求为中心的质量战略和以质量管理为根本内容的经营战略,提出了“以顾客需求为目标的全面质量经营”的新概念;加强研制阶段的质量设计和质量分析,尤其重视质量功能展开(QFD)、可靠性技术、田口方法、试验设计(DOE)、计算机辅助设计等新技术在设计过程中的应用,研制阶段的质量管理实现了规范化、程序化,并把能否将传统质量管理、可靠性工程和新兴的质量设计技术互相融合、互相渗透作为衡量一个公司是否为世界级公司的标志;着重建立强有力的供应商质量保证措施、完备的售后服务系统和质量信息系统;提出并行工程的概念,在产品设计阶段同时考虑产品整个寿命周期的全部要素(质量、成本、进度和用户要求),将产品设计与制造、保障过程的设计综合进行;以系统工程的方式开展质量保证工作,将技术的、组织的、管理的措施统一规划,将质量管理与优化设计、可靠性工程、市场营销、价值工程、仿真技术等互相渗透,采用多学科综合设计的方法,实现产品的高质量、高可靠性和高效益。先进的质量管理思想和方法促进了生产力的发展,并逐步形成了质量工程学科体系。

质量工程的产生标志着以管理职能为核心转向以技术为先导、以设计规范为目标转向以用户需求为目标的质量管理发展新趋势,是当代行之有效的最新质量管理技术的综合,是对质量管理的深化、完善和发展。

(2) 质量工程的概念及主要技术

作为质量管理最新发展的质量工程,其概念尚未统一。

广义的质量工程是指对产品开发全过程进行严密质量保证的系统工程方法。其内容包括保证产品设计与制造质量的一整套技

术以及贯彻程序化、规范化的系统工程管理方法。如美国国家标准协会/美国质量管理协会(ANSI/ASQC)A3-1978给出的质量工程定义如下:

“质量工程:有关产品或服务的质量保证和质量控制的原理及其实践的一个工程的分支。

说明:虽然并不要求每个工程师对以下各方面都能胜任,该工程的知识及应用技术包括(但并不限于):

- (a) 质量体系的开发和运行;
- (b) 质量保证和质量控制技术的开发和运用;
- (c) 为控制及改进的目的进行质量参数分析所应用的统计方法和计量方法;
- (d) 试验、检验和抽样程序的开发和分析;
- (e) 对人的因素和积极性与质量关系的理解;
- (f) 质量成本概念和技术的掌握;
- (g) 开发和支配管理信息的知识和能力,包括审核质量大纲以便确定和纠正缺陷;
- (h) 开发和实施产品、过程和服务的设计评审的知识和能力;
- (i) 安排恰当的分析以便确定哪些作业需要采取纠正措施的能力。”

狭义的质量工程是指保证产品开发全过程质量的技术与方法体系。如英国标准(BS4778-1979)对质量工程定义如下:

“质量工程:在达到所需要的质量过程中,适当的技术和技能的应用。”

我国国军标(GJB1405)给出的质量工程定义为:

“将现代质量管理的理论及其实践与现代科学和工程技术成果结合,以控制、保证和改进产品质量为目标而开发、应用的技术和技能。”

不论是广义的质量工程,还是狭义的质量工程,为改进和提高产品质量的技术和方法,都主要包括图 0-1 所示的内容。

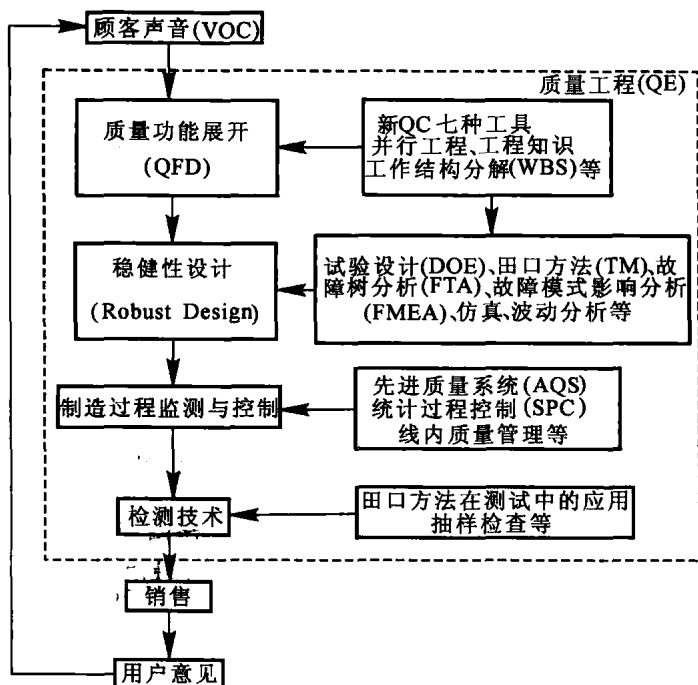


图 0-1 质量工程主要技术框图

(3) 质量工程的特点

质量工程具有以下显著特点：

①强调倾听顾客声音。用户需求既是出发点，又是归宿点。保证产品的低成本、高质量、高可靠性，满足用户和社会需求是质量工程追求的目标。

②体现技术与管理并重的原则。技术是质量管理的前提和基础，没有高技术，就不可能有高质量。高技术、高质量、高速度是赢得顾客，占领市场的最有效手段。开展以技术为先导的质量管理是质量管理发展的新趋势。

③设计阶段的质量保证是质量工程的重点。设计阶段既是产品固有质量形成的关键阶段，又是生产阶段质量控制的依据。因

此,稳健性设计技术及其先导程序——质量功能展开成为质量工程的关键技术,其目的是在资源最少的前提下,通过产品设计和工艺设计获得产品元器件的最好质量与可靠性,并制造一种无失误、一次成功的生产过程。

④质量工程是一项系统工程,它着眼于全局、全过程的系统优化。

⑤具有广泛的适应性、可剪裁性和可扩充性。质量工程不仅适用于现代高技术产品和复杂的大系统,也适用于一般的、简单的产品;既适用于硬件,也适用于软件。根据使用对象的不同,其应用的技术和方法可按需要进行剪裁或扩充,具有极强的适应性。

2. 质量工程的核心技术——稳健性设计

稳健性设计(Robust Design)又称健壮设计或鲁棒设计。它是在试验设计、田口方法基础上发展起来的低成本、高稳定性、高再现性的产品与技术开发、设计方法体系。其含义是以最小的资源消耗,通过产品设计、技术开发使产品或技术对于外界环境变化、零部件(元器件)制造公差和时间因素造成的老化、劣化、磨损等干扰的影响具有很强的抵抗能力,从而使产品具有高度稳定的性能,使开发的技术在大规模生产和各种不同使用条件下具有高度再现性,以达到稳定地、长期地满足顾客需求的目的。

稳健性设计是一种科学的、高效率、高效益的工程优化设计方法体系,是保证产品、技术研制开发质量的关键环节,是质量工程的核心技术。

当前,作为质量工程重要内容的稳健性设计在美国已成为一种时尚的口号,ROBUST已成为产品质量可靠、可以信赖和值得购买的标志。美国空军1987年颁布的可靠性与维修性2000年规划已将减少质量波动作为提高产品可靠性的主要措施;美国国防部1988年颁布的指令DODD5000.51“全面质量管理(TQM)”中已将稳健性设计的主要技术——田口方法与QFD、DOE、新QC

七种工具、SPC(统计过程控制)并列,作为研制国防产品承包商必须应用的质量工程技术;1991年2月美国国防部发布的DOD5000.2“防务系统采办的政策与程序”又进一步明确了稳健性设计的定义。稳健性设计已在日本、美国及许多技术先进国家得到广泛应用与推广。

(1) 稳健性设计的主要技术——田口方法

田口方法(Taguchi Methods)是当代日本著名学者田口玄一博士于20世纪70年代初期创立的质量工程新技术。它是一种最新颖、科学、有效的稳健性优化设计方法,是稳健性设计的主要技术。

与休哈特(W·A·Shewhart)的质量控制方法相同,田口方法的着眼点也在于对质量波动的控制,但其基本理论、观点、方法和应用范围不同。

休哈特质量控制理论的核心在于将工序质量波动控制在一定的范围,从而达到保证产品质量的目的。

田口方法的基本思想是将传统的产品设计、工艺设计程序改为按系统设计、参数设计、容差设计三次定量优化的程序。在三次设计中,以误差因素模拟造成产品质量波动的各种干扰,以信噪比作为衡量产品质量稳定性的指标,通过对试验数据的统计分析,找出性能最稳定、可靠,成本最低廉的设计方案,以达到最优的技术经济综合效果。

田口方法不仅可应用于生产制造阶段,更主要地应用于工艺设计、产品设计和技术开发阶段。田口方法的最大特点是将质量管理与经济效益联系在一起,运用数学方法,从工程观点、技术观点和经济观点对质量管理的理论和方法进行综合研究,从而形成了一套独具特色的、有效性、通用性、边缘性极强的质量设计、质量评价方法体系。田口玄一博士本人将其称之为“质量工程学”。美国将其誉之为“田口方法”。

田口的理论和方法不仅受到日本,同时也受到欧美各国应用

统计学家、质量管理学家和企业界人士的关注,并在工程实际中得到广泛应用。田口方法在日本电子、冶金、纺织、汽车等行业中的应用产生了巨大的经济效益。据资料介绍,日本数百家公司每年应用田口方法约完成十万项左右的实例研究。田口方法被日本人作为日本产品打入国际市场畅销不衰的奥妙之一,是日本经济腾飞的秘诀和日本的成功之道。

田口方法于 20 世纪 80 年代初期引入美国,首先在福特公司获得成功并引起轰动。之后,在美国工业界得到越来越广泛的应用。施乐、ITT、波音等公司应用田口方法取得显著成效。美国国家航空航天局(NASA)自 1994 年开始推行田口方法,从对高级领导人进行培训、转变观念入手,首先在航天飞机燃料贮箱设计中使其得到应用。据麻省理工学院调查,美国 70% 的工程技术人员均了解田口方法,而田口方法中的质量损失函数已普遍被美国人所接受,并认为田口方法与可靠性技术具有同等重要的意义。

田口方法在加拿大、墨西哥、英国、法国、德国、西班牙、葡萄牙、荷兰、芬兰、瑞典、比利时、卢森堡等国也都得到不同程度的推广和应用。

田口方法于 1980 年引入我国,并首先在机械工业得到研究与应用。自 1985 年,国防科技工业大力推广应用田口方法,已取得具有显著成效的案例近 300 项。

田口玄一博士因其创立的理论与方法成就卓著,曾四次获得“戴明奖”,1989 年获日本天皇授予的“蓝授带奖章”,并获得美国颁发的“威拉德·F·罗克韦尔(Willard F Rockwell)杰出技术奖章”,1992 年获美国航天局的“宇航奖”,1994 年获我国颁发的“友谊奖”,1997 年进入美国汽车殿堂,1998 年获美国机械学会奖励,并于同年被聘为美国质量协会名誉会员。

近半个世纪以来,田口方法在不断充实、完善和提高,由静态特性的稳健性设计发展到动态特性的稳健性设计,由稳健性产品设计发展到稳健性技术开发,由对目标功能的研究发展到对基本

功能的研究,由工艺或产品的单项稳健性开发发展到工艺与产品并行稳健性开发。研究的方法和技术手段愈来愈简化、巧妙,思维方式也愈来愈具有哲理性。从表 0-1 可以看出,在与产品质量形成全过程相关的各项质量活动中,田口方法的适用范围越来越广泛,其有效性也越来越显著。

表 0-1 企业质量活动与田口方法的关系

序号	质量活动	田口方法适用性	田口方法应用类型	质量阶段
1	技术开发	○	线外稳健性设计	源游阶段
2	产品规划	×		上游阶段
3	产品开发	○	线外稳健性设计	
4	工艺设计	○	线外稳健性设计	
5	生产制造	○	线内质量管理	中游阶段
6	销售	×		下游阶段
7	售后技术服务与监督	×		

本书将以田口方法为主要内容,阐述稳健性设计技术的基本理论与基本方法。

(2) 稳健性设计的先导程序——质量功能展开(QFD)

稳健性设计虽是设计方法体系中的重要技术,但只将其孤立地应用却不能完全发挥其效能。只有将其与其他质量工程技术与方法结合起来,配套使用,才能使其更加完善、更加系统化和卓有成效。QFD 是其配套技术中最主要的方法,是稳健性设计方法体系的顶层步骤和先导程序。它将帮助人们确定应用稳健性设计的关键零部件、关键部位、关键技术以及有关指标的相关关系。

QFD 是把顾客或市场的需求通过建立关系矩阵、相关矩阵和科学的加权评价方法转化为产品设计标准(产品特征、特性及规范)、零部件特性、工艺要求、监控及检测要求、售后服务措施等多层次演绎及确定工程和质量关键的分析方法。它既是稳健性设计

方法体系中必不可少的先导程序,又是质量系统工程的顶层步骤;既是一种直观、有效、系统的产品开发、研制的规划方法,又是一种重要的现代质量管理方法。它不仅可以应用于产品设计,还可应用于企业目标管理和工程决策等领域。

QFD 于 1972 年首创于日本三菱重工株式会社的神户造船厂,并在日本得到广泛应用,20 世纪 80 年代中期传到美国并首先应用于汽车工业,之后迅速推广到所有主要工业部门。目前, QFD 已在美国公司得到极为广泛的应用。许多大公司如波音、麦道、克莱斯勒(Chrysler)、福特等在产品研制和企业管理中都成功地运用了 QFD。克莱斯勒在开发每个新车型时,都首先应用 QFD 进行策略分析、顾客需求分析,并进行功能展开;麦道公司已将 QFD 应用于战术飞机的方案论证、设计决策和大型仿真系统的设计;波音公司 Renton 分部应用 QFD 进行目标管理等。西欧应用 QFD 的企业也迅速增加。欧美一些大学对 QFD 的研究活动也很活跃。

日本、美国的应用实践表明,运用 QFD 可大大减少设计更改次数,开展并行工程,使产品开发研制周期缩短三分之一,成本降低二分之一,产品设计质量大大提高。

QFD 于 20 世纪 90 年代引入我国,在少数企业进行了工程实践。目前,一些大学、研究所积极研究和推广应用 QFD,开发了 QFD 应用软件,并将科学的层次分析法(AHP)应用于 QFD,作为顾客需求重要度和顾客需求、工程措施关系度的评价方法。

3. 稳健性设计是提高产品可靠性的有效途径

作为表征产品性能指标时间延续性的可靠性指标是产品重要的质量特征,是质量的有机组成部分。

可靠性指标反映产品在规定条件下和规定时间内完成规定功能的能力。这种能力将随着时间的变化而变化,即随着时间的延长,产品的可靠性将逐渐降低。这种能力还与规定的条件密切相