

第三篇 适用性质量实现技术

[本篇学习提要]

“适用性”(Fitness for use)就是产品使用过程中成功地满足客户要求的程度。本篇阐述能增强满足用户给定要求能力的技术方法和工具。这些技术有助于学习者在把用户需求质量转化为所要开发的产品质量特性后,根据这些特性要求,以最经济的方法、手段设计出符合这些特性要求、质量稳定的产品,实现用户的适用性要求。第一篇阐述的技术方法是学好本篇技术的基础。本篇学习中应侧重掌握:

- 1.质量稳定性指标、质量损失函数及功能界限、容许差的确定方法;
- 2.三次设计技术,特别是参数设计和容许差设计的方法;
- 3.产品的可靠性评价方法和故障分析方法。

全国迷你型MBA职业经理双证班

认证系列: 高级职业经理 CEO 资格认证、人力资源总监、营销经理、财务总监、企业培训师、酒店经理、品质经理、生产经理、市场总监、营销策划师等学习认证系列。

颁发双证: 通用高级经理资格证书 + MBA 高等教育研修结业证书 (含 2 年全套学籍档案)

证书说明: 证书全国通用、国际互认、电子注册,是提干、求职、晋级、移民的有效依据

学习期限: 3 个月 (允许工作经验丰富学员提前毕业) **收费标准:** 全部学费 **1280** 元

学校网站: www.mhjy.net **报名电话:** 0451-88723232 **咨询邮箱:** xchy007@163.com

颁证单位: 中国经济管理大学

承办单位: 中国教育培训网 美华管理人才学校

全国招生 函授教育 颁发双证 权威有效



职业经理 MBA 整套实战教程

千本好书 **免费** 下载网址 www.mhjy.net

全国迷你型MBA职业经理函授双证班

颁发双证：注册钢印高级职业经理资格证书（可学分转移对接国际学位）+
国际 MBA 高等教育研修证书（随证书附带全套学员学习档案与中英文成绩单）。



招生专业及其颁发证书

认证项目	颁发证书（颁发双证 全国通用 电子查询）	收费标准
职业经理 MBA 高等教育双证班	1、高级注册职业经理 CEO 资格证书 2、两年制 MBA 高等教育研修结业证书	1280 元
人力资源总监 MBA 高等教育双证班	1、高级注册人力资源总监 CHO 资格证书 2、两年制 MBA 高等教育研修结业证书	1280 元
市场总监 MBA 高等教育双证班	1、高级注册市场总监 CMO 资格证书 2、两年制 MBA 高等教育研修结业证书	1280 元
营销经理 MBA 高等教育双证班	1、高级注册市场经理资格证书 2、两年制 MBA 高等教育研修结业证书	1280 元
企业培训师 MBA 高等教育双证班	1、高级注册企业培训师 TTT 资格证书 2、两年制 MBA 高等教育研修结业证书	1280 元
酒店经理 MBA 高等教育双证班	1、高级注册酒店经理资格证书 2、两年制 MBA 高等教育研修结业证书	1280 元
财务总监 MBA 高等教育双证班	1、高级注册财务总监 CFO 资格证书 2、两年制 MBA 高等教育研修结业证书	1280 元
品质经理 MBA 高等教育双证班	1、高级注册品质经理资格证书 2、两年制 MBA 高等教育研修结业证书	1280 元
生产经理 MBA 高等教育双证班	1、高级注册生产经理资格证书 2、两年制 MBA 高等教育研修结业证书	1280 元
营销策划师 MBA 高等教育双证班	1、高级注册营销策划师资格证书 2、两年制 MBA 高等教育研修结业证书	1280 元
企业总经理 MBA 高等教育双证班	1、高级注册企业总经理资格证书 2、两年制 MBA 高等教育研修结业证书	1280 元



【授课方式】 全国招生、函授学习、权威双证

我校采用国际通用3结合的先进教育方式授课（远程函授+教学电子光盘自修+网络学院持续视频学习）



【颁发证书】

学员毕业后可以获得权威双证书与全套学员学籍档案

- 1、毕业后可以获得相应专业钢印《高级职业经理资格证书》；
- 2、毕业后可以获得2年制的《MBA研究生课程高等教育研修结业证书》；
- 3、毕业后可以获得全套学员学籍档案和全国高级职业经理MBA人才推荐函。



【证书说明】

1. 证书加盖中国经济管理大学钢印和公章（全国通用、国际互认、电子注册查询）；
2. 证书是学员求职、提干、晋级、对接国际学位、出国公证的有效证明；
3. 毕业获取的证书与面授学员完全一致，无“函授”字样，与面授学员享有同等待遇。



【学习期限】

3个月（允许有工作经验学员提前毕业，毕业获取证书后学校仍持续辅导2年）



【收费标准】 全部费用1280元（含教材光盘、认证辅导、注册证书、学籍注册等全部费用）

函授学习为你节省了大量的宝贵的学习时间以及昂贵的MBA导师的面授费用，是职业经理人首选的学习方式。



【招生对象】

- 1、对管理知识感兴趣，具有简单电脑操作能力，有决心学好实战知识的各界学员均可报名学习。招生不限学历（我们更注重通俗易懂的实战教育）；
- 2、具备相应实际工作经验的学员允许提前毕业。
- 3、年龄在20—55岁之间的各界管理知识需求者均可报名学习。



【教程特点】

- 1、完全实战教材，注重企业实战管理方法与中国管理背景完美融合，关注学员实际执行能力的培养；
- 2、对学员采用1对1顾问式教学指导，确保学员顺利完成学业、胸有成竹的走向领导岗位；
- 3、互动学习（专家、顾问全天接受在线咨询，第一时间回答学员的提问和咨询），学员不仅可以就学习中遇到的难题进行咨询学习，在实际工作中遇到的企业难题也可以与指导教师进行沟通和交流、寻求解决方案。



【考试说明】

1. 卷面考核：毕业试卷是一套完整的情景模拟试卷（与工作相关联的基础问卷）
2. 论文考核：毕业需要提交2000字的论文（学员不需要参加毕业论文答辩但论文中必修体现出5点独特的企业管理心得）
3. 综合心理测评等问卷。



【颁证单位】

中国经济管理大学经中华人民共和国香港特别行政区批准注册成立。目前中国经济管理大学课程涉及国际学位教育、国际职业教育等，所颁发的各类证书国际互认、全国通用。学院教学方式灵活多样，注重人才的实际技能的培养，向学员传授先进的管理思想和实际工作技能，学院会永远遵循“科技兴国、严谨办学”的原则不断的向社会提供优秀的管理人才。



【承办单位】

美华教育是国内最早举办MBA实战教育的专业化办学单位之一，连续13年被教委评选为优秀成人教育学校，甲级先进办学单位，教育协会常务理事单位。美华人侧重于把复杂的知识简单化，深奥的理论通俗化，迄今为止，已为社会培养各类“能力型”管理人才近10万余人，并为多家企业提供了整合策划和企业内训。办学多年来，美华人独特的教学方法，先进的教学理念赢得了社会各界的高度赞誉和认可。



【指导教师】 实战派MBA导师徐传有教授等专家、顾问全程教学辅导。



【咨询电话】 0451——88723232



【咨询教师】 王海涛 王耀辉 郑毅



【报名须知】

- 1、报名时请直接邮寄4张2寸免冠近照（要求蓝色背景）和一张身份证复印件
- 2、报名登记表格下载后详细填写并发送邮件至 xchy007@163.com 或者传真至0451—88342620
- 3、交费后及时电话通知招生办确认，以便于收费当日学校为你办理教材邮寄等入学手续。



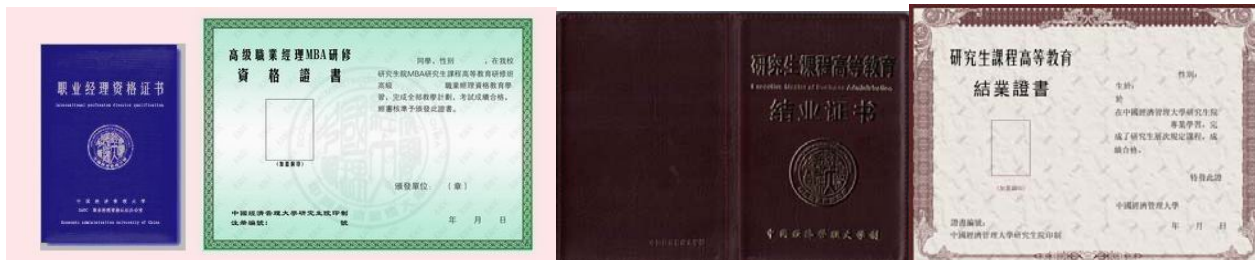
【报名地址】 哈尔滨市道外区南马路 120 号职工大学 109 室美华教育（ 邮政编码：150020）



【证书样本】(全国招生 函授学习 权威双证 请速充电)

(高级职业经理资格证书样本)

(两年制研究生课程高等教育结业证书样本)



【学费缴纳方式】

方式一	邮局邮寄	邮寄地址：哈尔滨市道外区南马路 120 号职工大学 109 室 邮政编码：150020
方式二	学校帐号	学校帐号：184080723702015 开户银行：哈尔滨银行龙江支行 企业户名：哈尔滨市道外区美华管理人才进修中心
方式三	交通银行 (太平洋卡)	帐号：40551220360141505 户名：王海涛 开户行：交通银行哈尔滨分行信用卡中心
方式四	邮政储蓄 (存折)	帐号：602610301201201234 户名：王海涛 开户行：哈尔滨道外储蓄中心
方式五	中国工商银行 (存折)	帐号：3500016701101298023 户名：王海涛 开户行：哈尔滨市道外区靖宇支行

可以选择任意一种方式缴纳学费，建议使用第五种方式（中国工商银行，比较方便快捷）收到学费的当天，学校就会用邮政特快的方式为你邮寄教材和考试问卷。

全国职业经理MBA双证班

精品课程 火热招生

函授学习 权威双证 全国招生 请速充电

认证系列：高级职业经理资格认证、人力资源总监、营销经理、财务总监、企业培训师、酒店经理、品质经理、生产经理、市场总监、营销策划师等学习认证系列。

颁发双证：通用高级经理资格证书 + MBA 高等教育研修结业证书（含 2 年全套学籍档案）

证书说明：证书全国通用、国际互认、电子注册，是提干、求职、晋级、移民的有效依据

学习期限：3 个月（允许工作经验丰富学员提前毕业） **收费标准：**全部学费 1280 元

学校网站：www.mhjj.net **报名电话：**0451-88723232 **咨询邮箱：**xchy007@163.com

颁证单位：中国经济管理大学 **承办单位：**中国教育培训网 美华管理人才学校

全国招生 函授教育 颁发双证 权威有效

第 6 章 参数设计基础知识

6.1 质量因素和质量特性

6.1.1 质量因素

质量管理中所考虑的质量因素是指那些对产品的质量特性或质量特性的波动有影响的原因。产品质量的优劣完全是由质量因素所决定的。

根据产品质量因素所起作用的不同，可把它们分为五种类型：

1. 可控因素

可控因素是指技术上能控制其水平的因素。即其水平可以比较且可以选择的因素。例如，化工生产中的温度、反应时间、浓度、催化剂等。又如机械加工中的切削速度、进刀量、加工方法，电子产品中电阻的阻值、电容的大小等都属于可控因素。

三次设计中考虑可控因素的目的在于，选取可控因素的最佳水平组合，尽量减少质量特性波动。

2. 标示因素

标示因素是外界环境、使用条件等因素。标示因素的水平虽然在技术上可以指定，但不能人为选择和控制在。例如，原材料种类，产品的使用条件——温度、湿度，电机的转速等。

三次设计考虑标示因素的目的在于不是选择其最佳水平，而是考察它与可控因素之间的相互作用，寻找最易方案的适用范围。

3. 区组因素

区组因素是具有水平，但其水平没有技术意义的因素。例如，加工产品时的不同操作者，不同原材料批号，不同的设备仪器、班组等都属于区组因素。

三次设计考虑区组因素的目的在于不使其水平效应混杂到可控因素的效应中去，以便提高试验的分析精度和检出精度。

4. 信号因素

信号因素是为了实现人的某种意志或达到目标所要求的结果而加以选取的因素。在望目特性的参数设计中，选取信号因素是为了校正质量特性的均值与目标值的偏差。在动态特性的参数设计中，选取信号因素，是为了赋予不同的目标值。

例如，对于汽车的操纵特性来说，需要的转弯半径可以通过方向盘的转向角达到，转向角即为信号因素。对于汽车、飞机、火车等运动机械来说，其目标速度可以通过改变速度位极来实现，这时的速度位极即为信号因素。

对于染色工艺来说，为了取得一定的着色度，可以通过改变燃料用量与配比来实现，配比于用量即为信号因素。

在具体问题中，应先取什么因素作为信号因素，要根据专业知识与实践经验加以确定。信号因素水平最好是易于改变且与产品的质量特性值之间呈现性关系，以确保校正工作易于进行。

5. 误差因素

误差因素是指除了上述的可控因素、标示因素、区组因素和信号因素以外，对产品质量有影响的所有其他因素的总称。比如，一些噪声或干扰因素就是常见的误差因素。噪声虽然有多种多样，但大致可以分为：

(1) 外噪声。在产品使用过程中，一切的环境条件的变化称为外噪声或外干扰。如温度、湿度、输入电压、操作者等的变化。

(2) 内噪声。组成产品的元部件或材料随着时间的推移所产生的老化或劣化成为内噪声或内干扰。例如塑料制品在使用一定时间后出现的易裂性而属内噪声。

(3) 物品间噪声。同一规格生产的产品的质量特性所呈现出的差异称为物品间噪声或物品间干扰。例如，按统一图纸加工的机械零件，其尺寸的差异即属于物品间噪声。

由于误差因素多，全面考虑不是不可能就是意义不大，在实际问题中，常只要考虑几个性质不同的主要误差因素即可。因为不受主要误差因素影响，质量稳定的产品，通常对其它误差因素的影响不敏感。

此外，为简化起见，在实际问题中，人们也时常把前述 4 类因素中那些对产品质量影响不显著的因素

并入误差因素来加以考察。

关于误差因素的水平选取问题，可参照下列进行：

对于二水平试验

第一水平=中心值- σ

第二水平=中心值+ σ

对于三水平试验

第一水平=中心值- $\sqrt{\frac{3}{2}}\sigma$

第二水平=中心值

第三水平=中心值+ $\sqrt{\frac{3}{2}}\sigma$

其中 σ 为该误差因素的波动标准差。

6.1.2 质量特性

在质量管理中，人们常把所考察的产品质量指标称作该产品的质量特性。用来表现质量特性的数据称为质量特性值。

在产品质量形成过程的各个环节，都存在着与质量特性相关的问题。至于要选取什么特性来表现产品质量问题是属于专业技术的任务，而选取什么特性值以及它的有效分析方法，则是质量管理技术的任务。

在质量管理活动中，最常见的质量特性有：

1. 望目特性

指存在固定的目标值 m (m 为非零有限数)，希望围绕目标值波动，且波动越小越好的质量特性。例如，若按图纸规定 $\Phi 15 \pm 0.03$ 加工某种零件，则零件的实际尺寸便是望目特性，其目标值即为 $m=15$ 。

2. 望小特性

指不取负值，越小越好，且波动小好的质量特性。例如，塑料制品的劣化系数、轴类的不圆度、测量的误差等都属于望小特性。

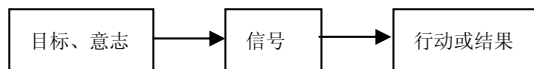
1. 望大特性

指不取负值，越大越好，且波动小好的质量特性。例如，抗拉强度、寿命等都属于望大特性。

4. 动态特性

目标值随信号因素水平的变化而变化的质量特性。如运动机械（汽车、火车等）的操纵特性，机床的切削特性，数字通信系统的输出特性等都属于动态特性。

动态特性的一般模式是：



此模式表明，对应于人的某个意志或目标，发出一个信号，便会产生一个相应的结果，此类特性即为动态特性。

此外，还有上位特性与下位特性等。

6.2 稳定性指标

要正确地评价产品质量的优劣，必须引入定量的衡量标准——稳定性指标。根据考虑问题的出发点不同，目前已提出了不少的定量计算公式。本书主要介绍日本的质量管理专家田口玄一博士所提出的信噪比公式。为此，在以下所考虑的问题中，均假设质量特性 y 满足 $y \sim N(\mu, \sigma^2)$ （即服从均值为 μ ，标准偏差为 σ 的正态分布）。

6.2.1 望目特性的 SN 比

当产品的质量特性 y 为望目特性时，设其目标值为 m ($m \neq 0$)，我们希望 $\mu = m$ ，且 σ 尽量地小。由于 σ 是反映质量波动偏差的绝对量，且随着 μ 的不同对它的要求也不一样。在概率论中，人们常用相对变化量——变异系数 C_v 来刻划分布的离散程度。

$$C_v = \frac{\sigma}{\mu}$$

显然, C_v 反映了产品质量特性的稳定程度, C_v 越大, 表示越不稳定。为了分析方便起见, 人们常以 $1/C_v = \mu / \sigma$ 作为产品质量优良性的度量指标, 或等效地以

$$\eta = \frac{\mu^2}{\sigma^2} \quad (6 \cdot 2 \cdot 2)$$

作为望目特性 y 优良性的度量。

田口玄一博士称 μ^2 为信号 (Signal), σ^2 为噪声 (Noise), 而把 (6·2·2) 式中地 η 称为望目特性的信噪比 (Signal- Noise Ration), 即 SN 比。

由于 μ 及 σ 一般是未知的, 为此人们常用实际观测数据来进行估计。为了尽量减少估计所带来的偏差, 采用了 σ^2 和 μ^2 的无偏估计 $\hat{\sigma}^2$ 及 $\hat{\mu}^2$ 分别进行代替。设已测得几件产品的质量特性值分别为 y_1, y_2, \dots

y_n 。记 $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$ 则有

$$\hat{\sigma}^2 = V_e = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (6 \cdot 2 \cdot 3)$$

再根据 $\bar{y} \sim N\left(\mu, \frac{\sigma^2}{n}\right)$ 可得

$$E(\bar{y} - \mu)^2 = \frac{\sigma^2}{n} \quad (6 \cdot 2 \cdot 4)$$

即:

$$E(\bar{y})^2 = \mu^2 + \frac{\sigma^2}{n} \quad (6 \cdot 2 \cdot 5)$$

故 μ^2 的无偏估计 $\hat{\mu}^2$ 为

$$\hat{\mu}^2 = (\bar{y})^2 - \frac{\sigma^2}{n} = \frac{1}{n} [n(\bar{y})^2 - V_e] \quad (6 \cdot 2 \cdot 6)$$

若记

$$S_m = n(\bar{y})^2 = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2 \quad (6 \cdot 2 \cdot 7)$$

则有

$$\hat{\mu}^2 = \frac{1}{n} (S_m - V_e) \quad (6 \cdot 2 \cdot 8)$$

所以 (6·2·2) 地估计式为

$$\hat{\mu} = \frac{\frac{1}{n} (S_m - V_e)}{V_e} \quad (6 \cdot 2 \cdot 9)$$

为了提高统计推断结论的有效性与可靠性, 在实际计算中, 常把 $\hat{\eta}$ 化成分贝 (decibel) 值, 即将 $\hat{\eta}$ 取常用对数, 再乘以 10。在不引起混淆的情况下, 仍记

$$\hat{\eta} = 10 \lg \frac{\frac{1}{n} (S_m - V_e)}{V_e} \quad (6 \cdot 2 \cdot 10)$$

这就是望目特性常用的 SN 比计算公式。

例 6-1 已知某电感电路是由电阻 R (单位: 欧姆 Ω) 和电感 L (单位: 亨利 H) 组成, 希望其输出电流 y (单位: 安培 A) 能稳定在 $m=10$ (A)。现通过试验测得两组数据在误差因素干扰下的观测值:

I: $R=0.5 \Omega$ $L=0.01H$ $y_1=21.5A$ $y_2=17.4A$

II: $R=1.0 \Omega$ $L=0.02H$ $y_1=1.0A$ $y_2=20.2A$

试确定哪组参数条件使输出电流更为稳定?

根据 I 组参数, 可得:

$$S_m = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2 = \frac{1}{2} (21.5 + 17.4)^2 = 756.605$$

$$V_e = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = \frac{1}{n-1} \left[\sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2 \right]$$

$$= \frac{1}{2-1} [21.5^2 + 17.4^2 - 758.605] = 8.405$$

$$\hat{\eta}_1 = 10 \lg \frac{\frac{1}{n} (S_m - V_e)}{V_e} = 10 \lg \frac{\frac{1}{2} (756.605 - 8.405)}{8.405} = 16.485$$

同理可求得 $\hat{\eta}_2 = 3.367$ 。故可认为第 I 组参数条件下的输出电流比第 II 组参数稳定。

6.2.2 望小特性的 SN 比

当产品的质量特性 y 为望小特性时, 一方面希望其数值越小越好, 另一方面希望其波动越小越好。由于 μ 取非负, 故等价于 $\mu^2 + \sigma^2$ 越小越好, 记

$$\eta = \frac{1}{\sigma^2 + \mu^2} \quad (6 \cdot 2 \cdot 11)$$

则显然 η 越大越好, 即表示产品质量特性越稳定。

由数理统计知识, $\sigma^2 + \mu^2 = E(y^2)$, 故若已知望小特性 y 的 n 个观测值为 y_1, y_2, \dots, y_n , 则 $E(y^2)$ 的无偏估计 $\hat{E}(y^2)$ 可表示成:

$$\hat{E}(y^2) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \quad (6 \cdot 2 \cdot 12)$$

从而导出 (6·2·11) 中 η 的一个估计式

$$\eta = \frac{n}{\sum_{i=1}^n y_i^2} \quad (6 \cdot 2 \cdot 13)$$

把 η 化成分贝值, 并记为:

$$\hat{\eta} = 10 \lg \frac{n}{\sum_{i=1}^n y_i^2} = -10 \lg \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \quad (6 \cdot 2 \cdot 14)$$

称 (6·2·14) 为望小特征 SN 比的计算公式。

例 6-2 已知经试验测得某种新产品与现有产品的磨损量 (单位: mm) 分别为

新: 20, 25, 30, 35; 现: 15, 30, 40, 50

由于磨损量可以看作是望小特性, 故有:

$$\hat{\eta}_{\text{新}} = -10 \lg \frac{1}{4} (20^2 + 25^2 + 30^2 + 35^2) = -28.962(\text{dB})$$

$$\hat{\eta}_{\text{旧}} = -10 \lg \frac{1}{4} (15^2 + 30^2 + 40^2 + 50^2) = -31.160(\text{dB})$$

根据 $\hat{\eta}_{\text{旧}} < \hat{\eta}_{\text{新}}$, 故可以认为新产品比现有产品的耐磨性能好。

6.2.3 望大特性的 SN 比

设产品质量特性 y 为望大特性, 则 $1/y$ 为望小特性, 由望小特性的 SN 比计算公式可得望大特性的 SN 比计算公式为:

$$\eta = -10 \lg \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \quad (6 \cdot 2 \cdot 15)$$

例 6-3 已知测得两种工艺生产的材料的抗拉强度 (单位: kg/mm²) 分别为

I: 45.6, 50.0; II: 60.0, 65.2

由于抗拉强度可看作望大特性，故有

$$\eta_I = -10 \lg \frac{1}{2} \left(\frac{1}{45.6^2} + \frac{1}{50.0^2} \right) = 33.561(\text{dB})$$

$$\eta_{II} = -10 \lg \frac{1}{2} \left(\frac{1}{60.0^2} + \frac{1}{65.2^2} \right) = 35.909(\text{dB})$$

根据 $\eta_{II} > \eta_I$ ，可以认为第 II 种工艺较第 I 种好。

6.2.4 动态特性的 SN 比

根据前面的定义知，动态特性是目标值随信号因素水平的变化而改变的质量特性，它与信号因素的关系通常假定为易于调节的线性关系，即特性 y 与信号因素 M 之间有下列关系

$$Y = \beta_0 + \beta_1 M + \varepsilon \quad (6 \cdot 2 \cdot 16)$$

其中 $\varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$

动态特性好，应表现为：第一，信号因素的灵敏度要高，即 $|\beta_1|$ 较大；第二，噪声的干扰越小越好，即 σ^2 越小越好，为了能兼顾这两方面，可把动态特性的 SN 比定义为：

$$\eta = \frac{\beta_1^2}{\sigma^2} \quad (6 \cdot 2 \cdot 17)$$

β_1 、 σ 一般未知，大多数情况是通过实测数据进行估计。

设信号因素 M 的 n 个水平值为 M_1, M_2, \dots, M_n ，每个水平 M_i 重复试验 r 次，所得特征值为 y_{i1}, y_{i2}, \dots ，

$$y_{ir} \text{。记 } \bar{M} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n M_i, \quad y_i = \sum_{j=1}^r y_{ij}, \quad \bar{y} = \frac{1}{nr} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^r y_{ij}, \quad S_T = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^r (y_{ij} - \bar{y})^2, \quad S_{MM} = r \sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2,$$

$$S_{My} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^r (M_i - \bar{M})(y_{ij} - \bar{y}) =$$

$$\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M}) y_i, \quad \text{则由线性回归知识知，} \beta_1 \text{ 的最小二乘估计}$$

$$\hat{\beta}_1 = \frac{S_{My}}{S_{MM}} \quad \text{且 } \hat{\beta}_1 \sim N(\beta_1, \sigma^2/S_{MM})。由此可导出 \hat{\beta}_1 \text{ 的无偏估计为}$$

$$\hat{\beta}_1^2 = (\hat{\beta}_1)^2 - \frac{\sigma^2}{S_{MM}} = \frac{S_{My}^2 - \sigma^2 S_{MM}}{S_{MM}^2} \quad (6 \cdot 2 \cdot 18)$$

而 σ^2 的无偏估计为：

$$\hat{\sigma}^2 = V_e = \frac{1}{nr-2} \left(S_r - \frac{S_{My}^2}{S_{MM}} \right) \quad (6 \cdot 2 \cdot 19)$$

故 β_1^2 的可计算的无偏估计式为

$$\hat{\beta}_1^2 = \frac{S_{My}^2 - V_e S_{MM}}{S_{MM}^2} \quad (6 \cdot 2 \cdot 20)$$

由 (6·2·19)、(6·2·20) 得出 (6·2·17) 的估计式

$$\hat{\eta} = \frac{\frac{1}{S_{MM}} (S_{My}^2 - V_e S_{MM})}{V_e} \quad (6 \cdot 2 \cdot 21)$$

$$S\beta = \frac{1}{S_{MM}} \left[\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M}) y_i \right]^2$$

其中

把 (6·2·21) 转化成分贝值，便得到动态特性 SN 比的计算公式

$$\hat{\eta} = 10 \lg \frac{\frac{1}{S_{MM}}(S_{\beta} - V_e)}{V_e} \tag{6 \cdot 2 \cdot 22}$$

当信号因素 M 的水平是取等间隔时，即 $M_{i+1}-M_i=h$ ($i=1, 2, \cdots, n$)， η 的估计式也可通过正交多项式回归结果导出，具体为：

$$\hat{\eta} = 10 \lg \frac{\frac{1}{rSh^2}(S_{\beta} - V_e)}{V_e} \tag{6 \cdot 2 \cdot 23}$$

其中
$$S_{\beta} = \frac{1}{r(\lambda^2 S)}(W_1 y_1 + W_2 y_2 + \cdots + W_n y_n)^2$$

$$V_e = \frac{1}{nr-2}[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^r (y_{ij} - \bar{y})^2 - S_{\beta}]$$

参数 $\lambda^2 S$, S , W_1 , W_2 , \cdots, W_n 可由表 6-1 查得

表 6-1 系数表										
水平数	n=2	n=3		n=4			n=5			
系数	b ₁	b ₁	b ₂	b ₁	b ₂	b ₃	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄
W ₁	-1	-1	1	-3	1	-1	-2	2	-1	1
W ₂	1	0	-2	-1	-1	3	-1	-1	2	-4
W ₃		1	1	1	-1	-3	0	-2	0	6
W ₄				3	1	1	1	-1	-2	-4
W ₅							2	2	1	1
$\lambda^2 S$	2	2	6	20	4	20	10	14	10	70
S	1/2	2	2/3	5	4	9/5	10	14	72/5	288/35

例 6-4 为了比较两种抗拉强度试验机 A₁ 和 A₂ 的精度，取截面积 M 为信号因素，其水平为 M₁=0.8 (mm²)，M₂=1.0 (mm²)，M₃=1.2 (mm²)，对于信号因素 M 的每一水平，重复试验两次，所得结果如下表所示：

表 6-2			
A ₁	试验 1	试验 2	Σ
M ₁	42.5	41.7	82.2
M ₂	51.3	54.2	107.5
M ₃	64.2	65.7	129.9
Σ			321.6

表 6-3			
A ₂	试验 1	试验 2	Σ
M ₁	41.2	44.2	87.4
M ₂	54.0	55.1	109.1
M ₃	64.7	62.2	130.9
Σ			327.4

试比较哪种试验机的特性好。

由于 M 的水平是等间隔的，故可采取两种方法求 SN 比值。首先利用（6·2·22）求 A₁ 的 SN 比：

$$Sr = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^2 (y_{ij} - \bar{y})^2 = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^2 y_{ij}^2 - \frac{(\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^2 y_{ij})^2}{2 \times 3} = (42.5^2 + 43.7^2 + \cdots + 65.7^2) - \frac{323.6^2}{6}$$

$$= 479.7733$$

$$S_{MM} = r \sum_{i=1}^3 (M_i - \bar{M})^2 = 2(0.2^2 + 0^2 + 0.2^2) = 0.16$$

$$S_{\beta} = \frac{1}{S_{MM}} [\sum_{i=1}^3 (M_i - \bar{M}) y_i]^2 = \frac{1}{0.16} [-0.2 \times 86.2 + 0.2 \times 129.9]^2 = 477.4225$$

$$V_e = \frac{1}{nr-2} (S_r - S_{\beta}) = \frac{1}{6-2} (479.7733 - 477.4225) = 0.5877$$

$$\hat{\eta}_{A1} = 10 \lg \frac{\frac{1}{S_{MM}} (S_{\beta} - V_e)}{V_e} = 10 \lg \frac{477.4225 - 0.5877}{0.5877 \times 0.16} = 37.05(\text{dB})$$

采用 (6·2·23) 式求 SN 比时, 由表 6-1 可得

$$S_{\beta} = \frac{1}{r(\lambda^2 S)} (\sum_{i=1}^3 W_i y_i)^2 = \frac{1}{2 \times 2} (-86.2 + 0 \times 107.5 + 129.9)^2 = 477.4225$$

$$\hat{\eta}_{A1} = 10 \lg \frac{\frac{1}{rSh^2} (S_{\beta} - V_e)}{V_e} = 10 \lg \frac{477.4225 - 0.5877}{2 \times 2 \times 0.2^2 \times 0.2877} = 37.05(\text{dB})$$

由此可知两种方法计算结果是一致的。同理可求得 $\hat{\eta}_{A2} = 37.24(\text{dB})$

由于 $\hat{\eta}_{A1} \approx \hat{\eta}_{A2}$, 故可认为两台试验机的抗拉强度的测试精度无显著差异。

6.3 质量损失函数

质量特性的波动是客观存在的, 而这种波动所造成的社会经济效果应如何予定量化度量呢? 田口玄一博士 60 年代根据质量是产品出厂后给社会带来的损失这一定义, 提出了质量损失函数。下面根据不同性质的质量特性逐一给出其对应的质量损失函数形式。

6.1.1 望目特性的质量损失函数

设望目特性 y 的目标值为 m , 显然又 y 取值越靠近 m 时, 损失越小, 越偏离 m 时, 损失越大, 即产品质量越差。设 \tilde{L} 表示质量损失, 则 \tilde{L} 是 y 的函数, 且 $\tilde{L}(y)$ 一定在 m 处取得最小值, (不妨设 $\tilde{L}(m)=0$), 且随 $|y-m|$ 的增大而增大, 故 $\tilde{L}(y)$ 具有如图 6-1 所示的形状。

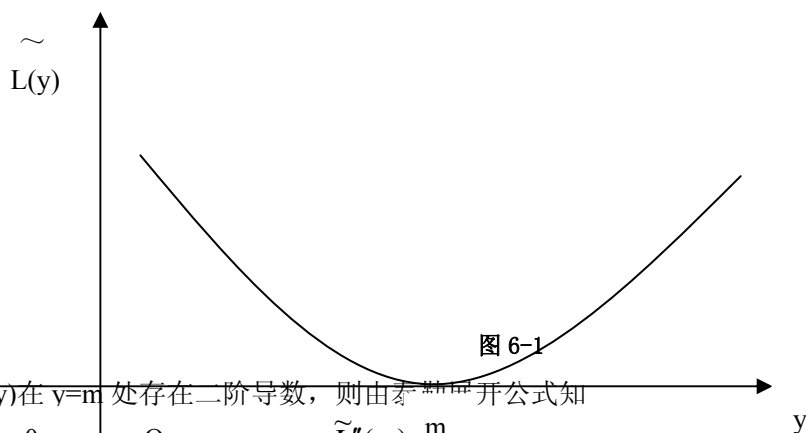


图 6-1

若 $\tilde{L}(y)$ 在 $y=m$ 处存在二阶导数, 则由泰勒展开公式知

$$\tilde{L}(y) = \frac{0}{1!} (y-m) + \frac{0}{2!} (y-m)^2 + \frac{\tilde{L}''(m)}{2} (y-m)^2 + \dots \quad (6 \cdot 3 \cdot 1)$$

由假设知 $\tilde{L}(m)=0$ $\tilde{L}'(m)=0$ 故有

$$\tilde{L}(y) \approx \frac{\tilde{L}''(m)}{2} (y-m)^2 \quad (6 \cdot 3 \cdot 2)$$

称 $L(y)=k(y-m)^2$ (6·3·3)

为望目特性的质量损失函数，其中 $k = \frac{1}{2!} \tilde{L}''(m)$

至于 (6·3·3) 中参数 k 的确定方法，一般有：

1. 根据功能界限 Δ_0 与相应的损失 A_0 确定 k 。

所谓的功能界限是指，当 $|y-m| < \Delta_0$ 时，产品能正常发挥功能，可以使用，而当 $|y-m| \geq \Delta_0$ 时，产品完全丧失它所具有的功能，不能使用，设产品完全丧失功能时的损失为 A_0 。则可认为在 $y=m \pm \Delta_0$ 处 $L(y)$ 的值等于 A_0 ，由式 (4·3·3) 可得

$$k = \frac{A_0}{\Delta_0^2} \quad (6 \cdot 3 \cdot 4)$$

2. 根据容差 Δ 与相应的损失 A 确定 k 。

所谓容差即公差的一半 Δ ，产品质量特性 y 满足 $|y-m| < \Delta$ 时，则为合格品；当 $|y-m| \geq \Delta$ 时，则为不合格品。若产品为不合格品时，工厂的损失为 A ，此时有 $L(m+\Delta)=L(m-\Delta)=A$ ，由 (6·3·3) 可得

$$k = \frac{A}{\Delta^2} \quad (6 \cdot 3 \cdot 5)$$

关于 Δ_0 与 Δ 的关系，可参看图 6-2

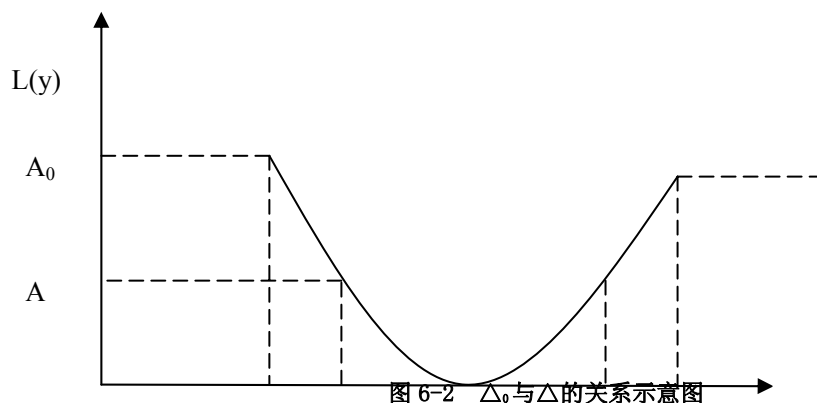


图 6-2 Δ_0 与 Δ 的关系示意图

例 6-5 某电视机电 限 $\Delta_0=25$ 伏，丧失功能的损失为 $A_0=300$ 元。

(1) 求损失函数中的参数 k ；

(2) 又已知不合格时的返修费 $A=1$ 元，求容差 Δ 。

$$k = \frac{A_0}{\Delta_0^2} = \frac{300}{25^2} = 0.48$$

解：(1)

故损失函数为

$$\tilde{L}(y) = 0.48(y-115)^2$$

$$k = \frac{A_0}{\Delta_0^2} = \frac{A}{\Delta^2}$$

(2) 由

$$\Delta = \sqrt{\frac{A}{k}} = \sqrt{\frac{1}{0.48}} \approx 1.44$$

在实际应用时，常常需考虑平均质量损失，即 $E[L(y)]$ ；平均质量损失表示每件产品因波动而带来的平均损失大小。当 $E(y)=m$ 时，则有

$$E[L(y)] = kE(y-m)^2 = k\sigma^2 \quad (6 \cdot 3 \cdot 6)$$

σ^2 一般未知，大多数情况下采用样本方差进行估计。若已知测得 n 件产品的质量特性值为 y_1, y_2, \dots, y_n ，则平均质量损失的估计值为：

$$\bar{L}(y) = k \left[\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - m)^2 \right] \quad (6 \cdot 3 \cdot 7)$$

6.1.2 望小特性的质量损失函数

望小特性完全可以看作目标值为零的望目特性，故由望目特性的质量损失函数可得望小特性 y 的质量损失函数为：

$$L(y)=ky^2 \quad (6 \cdot 3 \cdot 8)$$

其中 $k = \frac{A_0}{\Delta_0^2} = \frac{A}{\Delta^2}$ ， Δ_0 ， Δ ， A_0 ， A 的意义同前，须引起注意的是功能界限 Δ_0 指 $y \geq \Delta_0$ 时，产品完全丧失功能；容差 Δ 则指当 $y \geq \Delta$ 时，产品为不合格品。 $\Delta_0 > \Delta$ 仍成立。

单位产品的平均质量损失：

$$E[L(y)] = kE(y^2) \quad (6 \cdot 3 \cdot 9)$$

若已知望小特性 y 的 n 个观测值为 y_1, y_2, \dots, y_n ，则其单位产品的平均质量损失估计式为

$$\bar{L}(y) = k \left(\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (6 \cdot 3 \cdot 10)$$

6.1.3 望大特性的质量损失函数

因为望大特性 y 的倒数 $1/y$ 为望小特性，故望大特性 y 的质量损失函数为

$$L(y)=ky^{-2} \quad (6 \cdot 3 \cdot 11)$$

其中 $k = A_0 \Delta_0^2$ 或 $k = A \Delta^2$ ； A_0 ， Δ ， Δ_0 ， A 的意义同上。需说明的功能界限 Δ_0 指 $y \leq \Delta_0$ 时产品完全丧失功能；容差 Δ 则指 $y \leq \Delta$ 时，产品为不合格品。 Δ_0 与 Δ 的关系为 $\Delta > \Delta_0$ ；平均质量损失及其估计式分别为：

$$E[L(y)] = kE(y^{-2}) \quad (6 \cdot 3 \cdot 12)$$

$$\bar{L}(y) = k \left(\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n y_i^{-2} \right) \quad (6 \cdot 3 \cdot 13)$$

其中， y_1, y_2, \dots, y_n 为 n 个产品的测量数据。

例 6-6 设某种管子的粘接强度 y 小于 12 (kg·f) 时便不能使用，即 $\Delta_0=12$ (kg·f)；此时的损失为 $A_0=2000$ 元。

(1) 试求质量损失函数的参数 k 。

(2) 若已知产品为不合格时每件损失量 $A=30$ 元，试确定其容差 Δ 。

解：(1) $K = A_0 \Delta_0^2 = 2000 \times 12^2 = 288 \times 10^3$

故质量损失函数为

$$L(y) = 288 \times 10^3 y^{-2}$$

$$(2) \text{ 由 } \Delta^2 A = K, \text{ 得 } \Delta = \sqrt{\frac{K}{A}} = \sqrt{\frac{288 \times 10^3}{30}} \approx 98 (kg \cdot f)$$

复习思考题

1、选择题（部分答案可能不止一个）：

1) 标示因素的水平虽然在技术上可指定，但（ ）。

A、人为选择没意义 B、一般不指定 C、很少考虑

2) 已知望目特性 y 在某试验条件下的一组观测值为 $y_1=1.5$ 、 $y_2=3$ 、 $y_3=5$ ，则对应的 SN 比值为（ ）。

A、12.23 B、12.22 C、1.12

3) 已知 y 为望小特性，现有 y 的一组观测值 $y_1=5$ 、 $y_2=4$ 、 $y_3=2$ 、 $y_4=4$ ，若 $k=0.2$ ，则平均单位产品质量损失大小的估计值为（ ）。

A、1.05 B、0.24 C、12.20

4) 对于望目特性的质量损失函数 $L(y) = K(y-m)^2$ ，参数 K 的确定方法（ ）。

A、根据功能界限与相应的损失 B、根据容差及相应的损失

C、根据非线性效应 D、根据质量损失大小

5) 影响质量特性波动的因素有（ ）。

A、可控因素 B、误差因素 C、标示因素 D、方法

2、判断题：

1) 对于望大特性，其 SN 比值越大，表明质量特性越稳定。（ ）

全国迷你型MBA职业经理函授双证班

颁发双证：注册钢印高级职业经理资格证书（可学分转移对接国际学位）+
国际 MBA 高等教育研修证书（随证书附带全套学员学习档案与中英文成绩单）。



招生专业及其颁发证书

认证项目	颁发证书（颁发双证 全国通用 电子查询）	收费标准
职业经理 MBA 高等教育双证班	1、高级注册职业经理 CEO 资格证书 2、两年制 MBA 高等教育研修结业证书	1280 元
人力资源总监 MBA 高等教育双证班	1、高级注册人力资源总监 CHO 资格证书 2、两年制 MBA 高等教育研修结业证书	1280 元
市场总监 MBA 高等教育双证班	1、高级注册市场总监 CMO 资格证书 2、两年制 MBA 高等教育研修结业证书	1280 元
营销经理 MBA 高等教育双证班	1、高级注册市场经理资格证书 2、两年制 MBA 高等教育研修结业证书	1280 元
企业培训师 MBA 高等教育双证班	1、高级注册企业培训师 TTT 资格证书 2、两年制 MBA 高等教育研修结业证书	1280 元
酒店经理 MBA 高等教育双证班	1、高级注册酒店经理资格证书 2、两年制 MBA 高等教育研修结业证书	1280 元
财务总监 MBA 高等教育双证班	1、高级注册财务总监 CFO 资格证书 2、两年制 MBA 高等教育研修结业证书	1280 元
品质经理 MBA 高等教育双证班	1、高级注册品质经理资格证书 2、两年制 MBA 高等教育研修结业证书	1280 元
生产经理 MBA 高等教育双证班	1、高级注册生产经理资格证书 2、两年制 MBA 高等教育研修结业证书	1280 元
营销策划师 MBA 高等教育双证班	1、高级注册营销策划师资格证书 2、两年制 MBA 高等教育研修结业证书	1280 元
企业总经理 MBA 高等教育双证班	1、高级注册企业总经理资格证书 2、两年制 MBA 高等教育研修结业证书	1280 元



【授课方式】 全国招生、函授学习、权威双证

我校采用国际通用3结合的先进教育方式授课（远程函授+教学电子光盘自修+网络学院持续视频学习）



【颁发证书】

学员毕业后可以获得权威双证书与全套学员学籍档案

- 1、毕业后可以获得相应专业钢印《高级职业经理资格证书》；
- 2、毕业后可以获得2年制的《MBA研究生课程高等教育研修结业证书》；
- 3、毕业后可以获得全套学员学籍档案和全国高级职业经理MBA人才推荐函。



【证书说明】

1. 证书加盖中国经济管理大学钢印和公章（全国通用、国际互认、电子注册查询）；
2. 证书是学员求职、提干、晋级、对接国际学位、出国公证的有效证明；
3. 毕业获取的证书与面授学员完全一致，无“函授”字样，与面授学员享有同等待遇。



【学习期限】

3个月（允许有工作经验学员提前毕业，毕业获取证书后学校仍持续辅导2年）



【收费标准】 全部费用1280元（含教材光盘、认证辅导、注册证书、学籍注册等全部费用）

函授学习为你节省了大量的宝贵的学习时间以及昂贵的MBA导师的面授费用，是职业经理人首选的学习方式。



【招生对象】

- 1、对管理知识感兴趣，具有简单电脑操作能力，有决心学好实战知识的各界学员均可报名学习。招生不限学历（我们更注重通俗易懂的实战教育）；
- 2、具备相应实际工作经验的学员允许提前毕业。
- 3、年龄在20—55岁之间的各界管理知识需求者均可报名学习。



【教程特点】

- 1、完全实战教材，注重企业实战管理方法与中国管理背景完美融合，关注学员实际执行能力的培养；
- 2、对学员采用1对1顾问式教学指导，确保学员顺利完成学业、胸有成竹的走向领导岗位；
- 3、互动学习（专家、顾问全天接受在线咨询，第一时间回答学员的提问和咨询），学员不仅可以就学习中遇到的难题进行咨询学习，在实际工作中遇到的企业难题也可以与指导教师进行沟通和交流、寻求解决方案。



【考试说明】

1. 卷面考核：毕业试卷是一套完整的情景模拟试卷（与工作相关联的基础问卷）
2. 论文考核：毕业需要提交2000字的论文（学员不需要参加毕业论文答辩但论文中必修体现出5点独特的企业管理心得）
3. 综合心理测评等问卷。



【颁证单位】

中国经济管理大学经中华人民共和国香港特别行政区批准注册成立。目前中国经济管理大学课程涉及国际学位教育、国际职业教育等，所颁发的各类证书国际互认、全国通用。学院教学方式灵活多样，注重人才的实际技能的培养，向学员传授先进的管理思想和实际工作技能，学院会永远遵循“科技兴国、严谨办学”的原则不断的向社会提供优秀的管理人才。



【承办单位】

美华教育是国内最早举办MBA实战教育的专业化办学单位之一，连续13年被教委评选为优秀成人教育学校，甲级先进办学单位，教育协会常务理事单位。美华人侧重于把复杂的知识简单化，深奥的理论通俗化，迄今为止，已为社会培养各类“能力型”管理人才近10万余人，并为多家企业提供了整合策划和企业内训。办学多年来，美华人独特的教学方法，先进的教学理念赢得了社会各界的高度赞誉和认可。



【指导教师】 实战派MBA导师徐传有教授等专家、顾问全程教学辅导。



【咨询电话】 0451——88723232



【咨询教师】 王海涛 王耀辉 郑毅



【报名须知】

- 1、报名时请直接邮寄4张2寸免冠近照（要求蓝色背景）和一张身份证复印件
- 2、报名登记表格下载后详细填写并发送邮件至 xchy007@163.com 或者传真至0451—88342620
- 3、交费后及时电话通知招生办确认，以便于收费当日学校为你办理教材邮寄等入学手续。



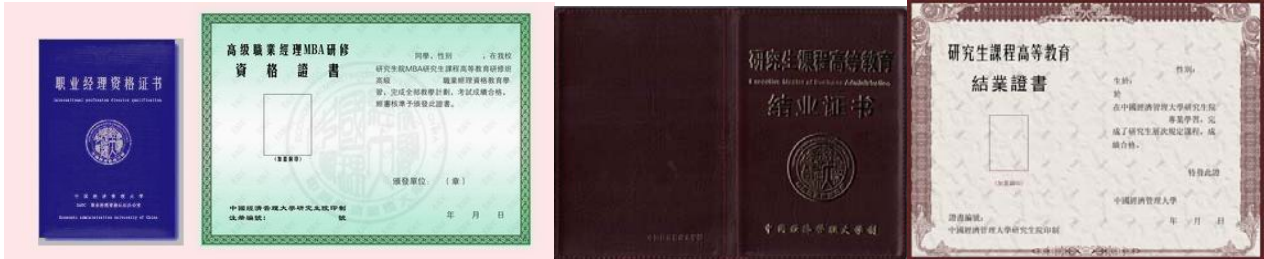
【报名地址】 哈尔滨市道外区南马路 120 号职工大学 109 室美华教育（ 邮政编码：150020）



【证书样本】(全国招生 函授学习 权威双证 请速充电)

(高级职业经理资格证书样本)

(两年制研究生课程高等教育结业证书样本)



【学费缴纳方式】

方式一	邮局邮寄	邮寄地址：哈尔滨市道外区南马路 120 号职工大学 109 室 邮政编码：150020
方式二	学校帐号	学校帐号：184080723702015 开户银行：哈尔滨银行龙江支行 企业户名：哈尔滨市道外区美华管理人才进修中心
方式三	交通银行 (太平洋卡)	帐号：40551220360141505 户名：王海涛 开户行：交通银行哈尔滨分行信用卡中心
方式四	邮政储蓄 (存折)	帐号：602610301201201234 户名：王海涛 开户行：哈尔滨道外储蓄中心
方式五	中国工商银行 (存折)	帐号：3500016701101298023 户名：王海涛 开户行：哈尔滨市道外区靖宇支行

可以选择任意一种方式缴纳学费，建议使用第五种方式（中国工商银行，比较方便快捷）收到学费的当天，学校就会用邮政特快的方式为你邮寄教材和考试问卷。

全国职业经理MBA双证班

精品课程 火热招生

函授学习 权威双证 全国招生 请速充电

认证系列：高级职业经理资格认证、人力资源总监、营销经理、财务总监、企业培训师、酒店经理、品质经理、生产经理、市场总监、营销策划师等学习认证系列。

颁发双证：通用高级经理资格证书 + MBA 高等教育研修结业证书（含 2 年全套学籍档案）

证书说明：证书全国通用、国际互认、电子注册，是提干、求职、晋级、移民的有效依据

学习期限：3 个月（允许工作经验丰富学员提前毕业） **收费标准：**全部学费 1280 元

学校网站：www.mhjj.net **报名电话：**0451-88723232 **咨询邮箱：**xchy007@163.com

颁证单位：中国经济管理大学 **承办单位：**中国教育培训网 美华管理人才学校

全国招生 函授教育 颁发双证 权威有效

- 2) 望小特性是指不取负值且希望取值越小越好的质量特性。()
- 3) 在动态特性的参数设计中,一定得考虑信号因素。()
- 3、什么叫质量因素?
- 4、什么叫望目特性? 什么叫望小特性? 什么叫望大特性?
- 5、什么叫动态特性?

[技能练习]

一、训练目的与要求

通过训练,使学生懂得求各种质量特性 SN 比值和质量损失函数。

二、训练过程与结果

提供练习题,由学生先独立完成,然后根据学生做的结果进行讲评。

实例:

【稳定性指标计算】

【例一】:已知某 R—L 电路希望输出电流 y 为 10 A,在误差因素的干扰下测得二组数据的观测值如下:

I: $R=0.8\Omega$ $L=0.02H$, $y_1=21.5A$ $y_2=18.0A$;

II: $R=1.0\Omega$ $L=0.05H$, $y_1=15.0A$ $y_2=20.0A$;

试确定哪组参数条件使输出电流更稳定?

解:由 I 组参数得

$$S_m = (\sum y_i)^2 / n = (21.5 + 18.0)^2 / 2 = 780.125$$

$$V_e = [\sum y_i^2 - (\sum y_i)^2 / n] / (n-1) = [21.5^2 + 18.0^2 - 780.125] / 2 = 6.125$$

$$\eta = 10 \lg \{ [S_m - V_e] / n \div V_e \} = 10 \lg \{ [780.125 - 6.125] / 2 \div 6.125 \} = 18.01 \text{ (dB)}$$

由 II 组参数得

$$S_m = (\sum y_i)^2 / n = (15.0 + 20.0)^2 / 2 = 612.5$$

$$V_e = [\sum y_i^2 - (\sum y_i)^2 / n] / (n-1) = [15.0^2 + 20.0^2 - 612.5] / 2 = 12.5$$

$$\eta = 10 \lg \{ [S_m - V_e] / n \div V_e \} = 10 \lg \{ [612.5 - 12.5] / 2 \div 12.5 \} = 13.80 \text{ (dB)}$$

结论: I 条件下的输出电流比 II 条件参数稳定。

【例二】已知用户对某产品的不圆度加工不稳定意见较大。公司组织攻关改进,改进前后的不圆度检验数据如下:前:15,20,18,后:12,20,14。问改进是否有成效?

解:不圆度是望小特性。 $\eta = -10 \lg [\sum y_i^2 / n]$

$$\eta_{\text{前}} = -10 \lg [\sum y_i^2 / n] = -10 \lg \{ [15^2 + 20^2 + 18^2] \div 3 \} = -25.00 \text{ (dB)}$$

$$\eta_{\text{后}} = -10 \lg [\sum y_i^2 / n] = -10 \lg \{ [12^2 + 20^2 + 14^2] \div 3 \} = -23.92 \text{ (dB)}$$

结论:由于 $\eta_{\text{前}} < \eta_{\text{后}}$,故不圆度稳定性有提高,改进有效果。

【例三】用平均无故障时间来度量彩电的优劣。现有甲乙二公司彩电平均无故障时间的抽样检测记录(单位:小时),请判断那家彩电质量稳定?

甲公司:18000,19500,21500;

乙公司:16500,20000,21000

解:越大越好,是望大特性。 $\eta = -10 \lg [\sum y_i^{-2} / n]$

$$\eta_{\text{甲}} = -10 \lg [\sum y_i^{-2} / n]$$

$$= -10 \lg \{ [18^{-2} + 19.5^{-2} + 21.5^{-2}] \div 3 \} = 25.81 \text{ (dB)}$$

$$\eta_{\text{乙}} = -10 \lg [\sum y_i^{-2} / n]$$

$$= -10 \lg \{ [16.5^{-2} + 20^{-2} + 21^{-2}] \div 3 \} = 25.51 \text{ (dB)}$$

$\eta_{\text{乙}} < \eta_{\text{甲}}$,可以认为甲公司的彩电比乙公司的彩电平均无故障时间波动较小,较稳定。甲公司的抽样平均无故障时间也比乙公司长,所以甲公司彩电寿命质量比乙公司好。(国家标准:彩电的平均无故障时间大于 1.5 万小时为合格品)

【质量损失函数求解】

【例一】某电源电路直流输出电压 y 的目标值为 $m=110$ 伏,功能界限为 25 伏,丧失功能的损失为 500 元,不合格的返修为 10 元,(1)求损失函数;(2)容差;(3)当 y 值为 110,115,112,108,109,106 时, $E[L(y)]$ 是多少?

解:公式: $L(y) = K(y-110)^2$

$$K = A_0 / \Delta_0^2 = A / \Delta^2$$

(1) $K = A_0 / \Delta_0^2 = 500 / 25^2 = 0.8$ 故质量损失函数为
 $L(y) = K(y-110)^2 = 0.8(y-110)^2$
 (2) $K = A / \Delta^2$
 $\Delta = (A / K)^{0.5} = (10 / 0.8)^{0.5} = 3.54$
 (3) $E[L(y)] = K[\sum (y_i - m)^2 / n] = K[\sum y_i^2 - (\sum y_i)^2 / n]$
 $= 0.8[(110^2 + 115^2 + 112^2 + 109^2 + 108^2 + 106^2) - (110 + 115 + 112 + 109 + 108 + 106)^2 / 6]$
 $= 0.8[(12100 + 13225 + 12544 + 11881 + 11664 + 11236) - 660^2 / 6]$
 $= 0.8[72650 - 72600] = 0.8 \times 50 = 40$

第 7 章 三次设计技术

7.1 质量设计的三个阶段

7.1.1 产品实体的质量设计

产品实体的质量设计，是探讨实现产品质量特性的手段，寻求改进产品系统结构、特性参数和容许差的途径。它要把产品质量的技术功能特性同经济特性联系起来一起考虑，做到不仅考虑企业成本、利益，更要考虑用户利益，使所设计的产品能更好地满足市场的需要，减缓产品劣化的趋势。

产品实体的质量设计包括系统设计、参数设计、容差设计三个阶段。系统设计控制的对象是产品质量特征的波动，参数设计控制的对象是构成产品的部件的参数的影响，而容差设计控制的对象是因素的波动。换言之，系统设计是解决产品质量特性在面临社会需求时所产生的波动；参数设计是解决产品各部件最适宜的质量特性中心值的选择；而容差设计是解决控制影响因素的波动。

7.1.2 产品质量的系统设计

企业确定了产品品种规划后，接着就要进入产品的系统设计阶段。系统设计是为了使系统结构发挥有效功能而作的一个项目系统结构要求方面的工作。系统设计的工作内容是设计出能满足用户需要的具体系统结构，即探求和设计出能满足产品质量规划所要求的具体产品。它是专业技术工作者运用专业技术知识结合质量管理原理，具体决定产品的功能、结构形式，它是铜产品的质量开发密切联系在一起的。其工作结果是提供产品的结构模型、零部件组合、整体功能特性以及详细的技术经济指标的明确答案。但对决定产品功能、结构形式的各个参数的确定是孤立的，很少判断参数组合之后会产生什么效应。

严格讲，产品质量的系统设计要分二步实现。第一步是系统结构的设计，第二步是给定的系统设计结构下，对系统输出进行指标设计。由于系统的输出通常是多个的，而各个输出之间又都是相互矛盾、相互制约的，因此第二步实际上是对系统的各个输出之间进行合理的分配。

在进行系统设计的第二步中，初始提出的设计指标要求不一定能实现。对于有些项目，它还有待于参数设计（若考虑成本的话，还有容差设计）的证实。如果初始设计指标要求不能够被满足，那么就必须修改初始设计指标要求，进行第二次参数设计和容差设计，……，如此不断循环，及至最后的系统指标设计是可行的。

比如要设计一个用于测量电阻值大小的电桥，就得考虑整个电桥应由哪些元器件组成以及它们之间是如何联结的等等。

在系统设计之后，如果产品的质量特性与质量因素之间存在确定的函数关系，则必须推导出该函数关系。这类产品的设计与分析完全可以通过计算来进行，故称之为可计算性产品。相反，不可计算性产品是产品质量特性与质量因素之间的确切函数关系无法导出或属非确定性关系，此时对于系统中的一组参数值，只能通过试验的方法来获得产品的质量特性值，而无法在试验前进行预先计算。

7.1.3 产品质量的参数设计

参数设计是根据系统设计所确定的结构，为使之发挥最佳功能，寻求达到质量特性目标稳定化的参数中心，并确定他们之间最佳组合关系的工作过程。在确定参数组合关系时，必须兼顾质量特性值同成本之间的关系，以便合理控制因素水平的变化，探索尽可能不受或少受干扰影响的参数水平组合，设计出物美价廉的产品。

参数设计是体现产品质量功能适用性和经济适用性之间最佳平衡的一项具体技术工作，是专业技术和质量优化技术的结合，因而是使成本下降，质量提高的一项有效方法。

参数设计一般采用正交表进行设计，SN 比作为分析指标，对于可计算性产品，参数设计一般不必搞试验，而是直接通过系统设计中已经求出的函数关系利用正交表和 SN 比分析方法来确定系统因素的最宜参数组合，非可计算性产品则一定要通过试验来确定最宜参数组合。

在参数设计中所使用的零部件大多数是价格低廉的三级品，那么它为什么能使整个系统（产品）质量达到令人满意的状态呢？这主要得益于非线性效应的利用，使所确定的参数水平组合具有抑制衰减参数波动对质量的特性的影响。通常，系统（产品）的质量特性与各零部件参数之间存在非线性关系。例如，已知电视机电源电路输出电压 y 的目标值是 $m=110V$ ， y 与电路中某元部件参数 A 之间存在着如图 7-1 所示的非线性关系。现选用三级品零部件做试验，当 A 的水平为 A_1 ，波动幅度 ΔA ，此时对应于 A_1 有 $y=m$ ，其波动大小为 Δy_1 。通过参数设计找到 A 的新水平 A_2 ，其波动幅度仍为 ΔA ，此时对应于 A_2 的质量特性值记为 \bar{m} ，其波动大小 Δy_2 。由图 5-1 可知， $\Delta y_2 \ll \Delta y_1$ 。这表明只要合理选择参数中心值，就能在参数波动大小不变的情况下，大大缩减产品质量特性的波动范围。

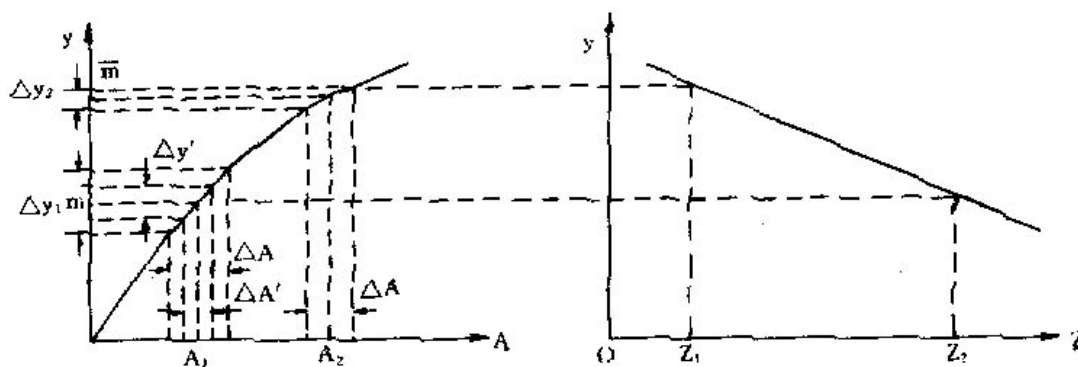


图 7-1 参数设计示意图

由图 7-1 知，当因素 A 的水平从 A_1 移至 A_2 时，目标特性值 y 产生了偏移量 $\Delta m = \bar{m} - m$ 。如何才能把偏移量 Δm 消除，使质量特性 y 波动变小又围绕 m 波动呢？一般是通过设置一个与 y 之间具有线性关系，且易于调节的元器件，记其参数为 Z ，既有 $y = \beta_0 + \beta_1 Z$ ， β_0, β_1 为常数。于是只要把 Z 从 Z_1 处调节为 Z_2 时，偏移量 Δm 即消失。 Z 一般称作信号因素。

如果不进行参数设计，而是单纯追求系统（产品）各元器件的质量，即使把三级品均换成一级品或特级品，有时都难以使系统（产品）的质量令人满意。在前述例子中，如使参数 A 的波动范围由 ΔA 变为 $\Delta A'$ ，此时对应于 A_1 的 y 值仍有大小为 $\Delta y_1'$ 的波动，虽然 $\Delta y_1' < \Delta y_1$ ，但 $\Delta y_1' \gg \Delta y_2$ 。由此可见，参数设计在质量设计中发挥着重要作用。

7.1.4 产品质量的容许差设计

参数设计之后，一般得进行容许差设计。

在生产技术工作中，产品质量特性值允许的波动大小称为公差，记作 δ 。公差的一半 Δ 称为容许差。即： $\Delta = \delta / 2$ 。

容许差设计是就各参数水平的波动范围和误差因素选择决定容许差的设计工作，它是研究影响产品质量波动的各种原因的主次关系，并把主要原因抑制在一定范围之内，既保证用户损失最小，又要使企业生产成本最低。或者说，容差设计是在参数设计决定了参数中心值后，就各参数水平的波动范围和误差因素，决定容许差的设计。它的任务，是针对主要的误差因素，选择波动小的优质零部件，以衰减质量特性值的波动。

容差设计，一方面能衰减产品质量特性值的波动，即减少损失；另一方面又由于采用优质零件时又要增加成本，所以是否要进行容差设计须作综合分析，一般只有参数设计未能使内、外干扰充分衰减时，才宜进行容差设计。不过，通过参数设计做出的方案，能完全符合质量目标要求得并不多，因而，某种程度的容差设计总是必要的。

3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	15.9
4	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	1	36.4
5	2	2	2	2	3	3	3	3	1	1	1	1	1	28.6
6	3	3	3	3	1	1	1	1	2	2	2	2	1	7.2
7	1	1	2	3	1	2	3	3	1	2	2	3	1	16.5
8	2	2	3	1	2	3	1	1	2	3	3	1	1	13.0
9	3	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	1	28.0
10	1	1	3	2	1	3	2	3	2	1	3	2	1	15.0
11	2	2	1	3	2	1	3	1	3	2	1	3	1	16.4
12	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	2	1	1	25.5
13	1	2	3	1	3	2	1	3	3	2	1	2	2	43.8
14	2	3	1	2	1	3	2	1	1	3	2	3	2	-8.3
15	3	1	2	3	2	1	3	2	2	1	3	1	2	14.6
16	1	2	3	2	1	1	3	2	3	3	2	1	2	29.0
17	2	3	1	3	2	2	1	3	1	1	3	2	2	6.9
18	3	1	2	1	3	3	2	1	2	2	1	3	2	14.7
19	1	2	1	3	3	3	1	2	2	1	2	3	2	21.5
20	2	3	2	1	1	1	2	3	3	2	3	1	2	17.4
21	3	1	3	2	2	2	3	1	1	3	3	2	2	14.0
22	1	2	2	3	3	1	2	1	1	3	3	2	2	46.5
23	2	3	3	1	1	2	3	2	2	1	1	3	2	5.5
24	3	1	1	2	2	3	1	3	3	2	2	1	2	-8.2
25	1	3	2	1	2	3	3	1	3	1	2	2	3	27.3
26	2	1	3	2	3	1	1	2	1	2	3	3	3	43.4
27	3	2	1	3	1	2	2	3	2	3	1	1	3	-20.9
28	1	3	2	2	2	1	1	3	2	3	1	3	3	44.1
29	2	1	3	3	3	2	2	1	3	1	2	1	3	39.3
30	3	2	1	1	1	3	3	2	1	2	3	2	3	-17.0
31	1	3	3	3	2	3	2	2	1	2	1	1	3	23.0
32	2	1	1	1	3	1	3	3	2	3	2	2	3	44.2
33	3	2	2	2	1	2	1	1	3	1	3	3	3	-0.9
34	1	3	1	2	3	2	3	1	2	2	3	1	3	43.4
35	2	1	2	3	1	3	1	2	3	3	1	2	3	-7.7
36	3	2	3	1	2	1	2	3	1	1	2	3	3	8.0
I	378.7	174.6	251.0	68.0	331.0									Σ=685.0
II	225.4	253.3	254.8	222.2	236.2									
III	80.9	257.1	179.2	394.8	117.8									

3.确定误差因素及其水平表

望目特性的最佳参数组合不仅应使特性值围绕目标值，而且还应在各种误差干扰下波动最小。当然，此处不能直接由内表各号试验的特性值的大小去比较它们的优劣，而应在考察每号试验的误差干扰下特性值变化以后，再兼顾两方面要求的优良性指标 SN 比去评价它们的优劣。为此，以内表每号试验各因素的取值为中心值，根据各元器件波动的幅度的大小，列出误差因素水平的变化表。

根据本例特点，把组成电桥的所有元件选作为误差因素，即 A，B，C，D，E，F，X 均作为误差因素，它们的波动幅度如表 7-3。

表 7-3 误差因素级表

因素	A(%)	B(%)	C(%)	D(%)	E(%)	F(%)	X(安培)
----	------	------	------	------	------	------	-------

水平							
第一水平	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-5.0	-0.3	-0.0002
第二水平	0	0	0	0	0	0	0
第三水平	0.3	0.3	0.3	0.3	5.0	0.3	0.0002

因素 B、X 列为误差因素，是考虑到当电流表读数为 0 时，可能还有 0.0002 安培的电流通过；虽然 E 对测量误差一般不会发生什么影响，但考虑到使用低价电池，可节约成本。根据表 7-1，对于内表每一号试验条件，可得一个对应的误差因素水平表。例如，对于内表第 2 号试验条件，其误差水平如表 7-4 所示。

表 7-4 2 号试验条件误差水平表

因素	A	B	C	D	E	F	X
水平							
第一水平	99.7	1.994	9.97	9.97	5.7	9.97	-0.0002
第二水平	100	2	10	10	6	10	0
第三水平	100.3	2.006	10.03	10.03	6.3	10.03	0.0002

4. 外设计

称安排误差因素的正交表为外表，相应的设计为外设计。由于按误差因素水平表的完全搭配进行试验，工作量太大，有时限于客观条件的制约，也是不可能的，在这种情况下，大多采用正交表进行抽样试验。本例仍选用正交表 $L_{36}(3^{13})$ 作为外表。将误差因素 A, B, C, D, E, F, X 依次排在 $L_{36}(3^{13})$ 的第一、二、三、四、五、六、七列上（当然也可以采用其他排法）。对应于内表第 2 号试验条件的外表（也称误差正交表）如表 7-5 所示。

表 7-5 第 2 号试验列表设计

列号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	$y' = y - 2$
试验号	A	C	D	E	F									
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.1123
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	0.0000
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	-0.1023
4	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	1	-0.0060
5	2	2	2	2	3	3	3	3	1	1	1	1	1	-0.1079
6	3	3	3	3	1	1	1	1	2	2	2	2	1	0.1252
7	1	1	2	3	1	2	3	3	1	2	2	3	1	-0.1188
8	2	2	3	1	2	3	1	1	2	3	3	1	1	0.1009
9	3	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	1	0.0120
10	1	1	3	2	1	3	2	3	2	1	3	2	1	-0.0120
11	2	2	1	3	2	1	3	1	3	2	1	3	1	-0.1012
12	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	2	1	1	0.1079
13	1	2	3	1	3	2	1	3	3	2	1	2	2	0.0950
14	2	3	1	2	1	3	2	1	1	3	2	3	2	0.0120
15	3	1	2	3	2	1	3	2	2	1	3	1	2	-0.1132
16	1	2	3	2	1	1	3	2	3	3	2	1	2	-0.1241
17	2	3	1	3	2	2	1	3	1	1	3	2	2	0.1317
18	3	1	2	1	3	3	2	1	2	2	1	3	2	-0.0120
19	1	2	1	3	3	3	1	2	2	1	2	3	2	0.1201
20	2	3	2	1	1	1	2	3	3	2	3	1	2	0.0000
21	3	1	3	2	2	2	3	1	1	3	3	2	2	-0.1250
22	1	2	2	3	3	1	2	1	1	3	3	2	2	0.0060
23	2	3	3	1	1	2	3	2	2	1	1	3	2	-0.1247
24	3	1	1	2	2	3	1	3	3	2	2	1	2	0.1138

25	1	3	2	1	2	3	3	1	3	1	2	2	3	-0.1129
26	2	1	3	2	3	1	1	2	1	2	3	3	3	0.0951
27	3	2	1	3	1	2	2	3	2	3	1	1	3	0.0120
28	1	3	2	2	2	1	1	3	2	3	1	3	3	0.0186
29	2	1	3	3	3	2	2	1	3	1	2	1	3	-0.0060
30	3	2	1	1	1	3	3	2	1	2	3	2	3	-0.1197
31	1	3	3	3	2	3	2	2	1	2	1	1	3	0.0060
32	2	1	1	1	3	1	3	3	2	3	2	2	3	-0.1133
33	3	2	2	2	1	2	1	1	3	1	3	3	3	0.1194
34	1	3	1	2	3	2	3	1	2	2	3	1	3	-0.0957
35	2	1	2	3	1	3	1	2	3	3	1	2	3	0.1194
36	3	2	3	1	2	1	2	3	1	1	2	3	3	-0.0120

5.外表特性值的计算

由于本例属可计算性产品的参数设计，故由式（7·2·1）便可算出外表每号条件的特性值。例如表 7-5 中第一号条件的特性值。

$$y = \frac{B_1 D_1}{C_1} - \frac{X_1}{C_1^2 E_1} [A_1 (D_1 + C_1) + D_1 (B_1 + C_1)] [B_1 (C_1 + D_1) + F_1 (B_1 + C_1)]$$

$$= \frac{1.994 \times 9.97}{9.97} + \frac{0.0002}{9.97^2 \times 5.7} [99.7(9.97 + 9.97) + 9.97(1.994 + 9.97)]$$

$$\times [1.994(9.97 + 9.97) + 9.97(1.994 + 9.97)] = 2.1123$$

它与目标值 $m=2$ 的偏差为：

$$y_1' = y_4 \cdot m = 2.1124 - 2 = 0.1123$$

同理可算出表 7-5 其它各号试验的偏差值 y_i 。具体数值列于表 7-5 最后一列。

2. 内表 SN 比的计算

对于内表的每一号试验条件，都有一张具有 36 个特性值的外表，由于本例属望目特性，根据望目特性 SN 比计算公式，利用这 36 个特性值便可得其对应的 SN 比。例如对于第 2 号试验条件。有：

$$Sm = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2 = \frac{1}{n} \left(2n + \sum_{i=1}^n y_i' \right)^2 = \frac{1}{36} (2 \times 36 + 0.0994)^2 = 143.6027$$

$$Ve = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i' - \bar{y}')^2 = \frac{1}{n-1} \left[\sum_{i=1}^n y_i'^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n y_i' \right)^2 \right]$$

$$= \frac{1}{36-1} [0.1123^2 + \dots + (-0.0120)^2 - \frac{0.0994^2}{36}] = 8.498 \times 10^{-3}$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i, \quad \bar{y}' = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i'$$

其中
故

$$\eta = 10 \lg \frac{\frac{1}{n} (S_m - V_e)}{V_e} = 10 \lg \frac{\frac{1}{36} (143.6027 - 8.498 \times 10^{-3})}{9.677 \times 10^{-3}} = 26.7(\text{dB})$$

同理可计算出内表其它各号试验的 SN 比值。

7. 内表的方差分析与显著性检验。

对内表的 SN 比值进行方差分析与显著性检验的目的在于找出对质量特性具有重要影响作用的因素，以便对这些因素进行控制，以取得满意的质量特性值。

根据表 7-2 最后一栏的数据，可算得各因素所引起的平方和及总平方和；如

$$S_A = (I_A^2 + II_A^2 + III_A^2) \times q/N - (I_A + II_A + III_A)^2/N$$

$$= \frac{378.7^2 + 225.4^2 + 80.9^2}{36/3} - \frac{685.0^2}{36} = 3696.227 (f_A = 2)$$

其中 q 是因素 A 的水平数。

同理可算得：

$$S_c = 361.51(f_c = 2), \quad S_D = 302.36(f_D = 2)$$

$$S_E = 4454.63(f_E = 2), \quad S_F = 1901.66(f_F = 2)$$

$$ST = \sum_{i=1}^N (\eta_i - \bar{\eta})^2 = \sum_{i=1}^N \eta_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^N \eta_i)^2}{N} = (32.2^2 + 26.7^2 + \dots + 8.9^2) - \frac{685.0^2}{36}$$

$$\text{由 } = 11392.93(f_T = 35)$$

$$\text{得 } S_e = S_T - S_A - S_C - S_D - S_E - S_F = 676.54 \quad (f_e = 25)$$

另一方面，由下式可计算出表 7-6 方差分析表，作显著性检验。

$$V_i = \frac{S_i}{f_i} \quad F_i = \frac{V_i}{V_e} \quad i=A, B, C, D, E, F, e$$

表 7-6

方差来源	S	f	V	F	临界值		显著性
					$F_{0.05}(2, 25)$	$F_{0.01}(2, 25)$	
A	3696.227	2	1848.114	68.30	1.38	5.57	* *
C	361.51	2	180.76	2.68			* *
D	302.36	2	151.18	5.59			* *
E	4454.63	2	2227.32	82.31			* *
F	1901.66	2	950.83	35.14			* *
e	676.54	25	27.06				
Σ	11392.93	35					

8.最宜条件的确定

参数的最宜水平组合的确定应参照以下原则：

(1) 显著因素区最优水平，即相对于 SN 比最大的水平。

(2) 不显著因素水平可任选，或者按 SN 比最大，或者参照其它指标选取。

由于本例可控因素的方差均显著，故最宜条件为：A₁, C₃, D₂, E₃, F₁。由表 7-2 水平和 I、II、III 知，C₂, C₃ 的 η 值相差无几，又 C₂ 为现在的中心值，因此最后取 A₁, C₂, D₂, E₃, F₁ 为最宜条件。至此，完成了电桥的参数设计。

7.2.2 综合误差因素法

在上例中，质量特性 y 与各因素水平之间的关系是已知的函数关系。因而对于计算机的辅助设计来完成参数设计工作。若 y 与各因素水平之间的关系式未知，一种解决方法是利用历史数据，确定它们之间的统计关系式，即求回归方程，然后不经过试验，而借助计算机辅助设计进行参数设计。另一种方法是采用抽样调查进行试验——正交表试验法。有时受客观条件的限制，要求试验次数不能过多，此时一种解决办法是选用试验次数较少的正交表。另一种方法是对误差因素进行合并，用“综合误差因素法”进行参数设计。对于可计算性问题，通过综合误差因素法可达到减少计算量的目的。以下通过电感电路的参数设计来说明综合误差因素法的实施过程。

例 7-2 设计一个 R-L 电路，此电路由电阻 R(Ω)、电感 L(H) 组成，线路图如图 7-2 所示。当输入的交流电电压为 V(V)，频率为 f(Hz) 时，输出的电流强度 y 可由式

$$y = \frac{V}{\sqrt{R^2 + (2\pi fL)^2}} \quad (A) \quad (7 \cdot 2 \cdot 2)$$

求得。

本电路参数设计的目的是确定组成电器各元器件的参数。使电路的质量特性——输出电流强度 y 围绕目标值 m=10A 波动，且波动尽量小。

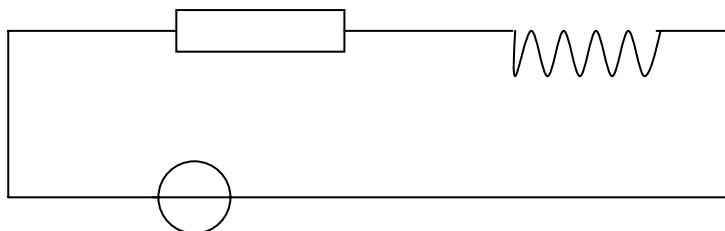


图 7-3 R-L 电路

1.确定可控因素及其水平表

把组成电路的两个元件 R 和 L 选为可控因素，并各选 3 个水平，具体如表 7-7 所示。

表 7-7 R-L 可控因素水平表

水平	1	2	3
因素			
R(Ω)	0.5	5.0	9.5
L(H)	0.01	0.02	0.03

2.内设计

由于可控因素只有两个，故采用全部试验，并把它作为内表，具体见表 7-9 的前三列。

3.确定误差因素及其水平表

根据经验确定四个误差因素：电路电压 V、输入电流频率 f、电阻 \tilde{R} 和电感 \tilde{L} 。所取得水平表如表 7-8 所示。

表 7-8 误差因素水平表

水平	1	2	3
因素			
电路电压 V	90	100	110
交流电频率 f	50	55	60
电阻 \tilde{R} (Ω)	-10%	0	10%
电感 \tilde{L} (H)	-10%	0	10%

其中 \tilde{R} 、 \tilde{L} 各水平的意义是对内表的每号试验，以 R、L 值为第二水平。R、L 值的-10%、10%波动分别为第一、第三水平。

4.综合误差因素

为减少试验或计算次数，可以把所有的误差因素综合成一个综合误差因素 N，N 的水平一般有 3 个：

N₁：负侧最坏条件，即使质量特性取最小值的误差因素水平组合。

N₂：标准条件，即各误差因素均取第二水平的组合。

N₃：正侧最坏条件，即使质量特性取最大值的误差因素水平组合。

对于例 7-2 由式 (7·2·2) 知，当 V 大，R、f、L 小时会使输出电流增大，而当 V 小，R、f、L 大时，会使输出电流减少，故有

$$N_1: V_1 f_3 \tilde{R}_3 \tilde{L}_3; N_2: V_2 f_2 \tilde{R}_2 \tilde{L}_2; N_3: V_3 f_1 \tilde{R}_1 \tilde{L}_1$$

为进一步减少试验次数，本例不考虑 N₂，仅考虑最坏条件 N₁ 和 N₃，即对内表的每一号试验条件以综合误差因素 N₁、N₃ 分别作试验，具体试验及其结果可参见表 7-9 中 N₁、N₃ 及所在列。

表 7-9

试验号	R	L	N ₁				N ₃				y		η
			V ₁	f ₁	\tilde{R}_3	\tilde{L}_3	V ₃	f ₁	\tilde{R}_1	\tilde{L}_1	N ₁	N ₃	
1	1	1	90	60	0.55	0.011	110	50	0.45	0.009	21.5	38.4	7.6
2	1	2	90	60	0.55	0.022	110	50	0.45	0.018	10.8	19.4	7.5
3	2	2	90	60	0.55	0.033	110	50	0.45	0.027	7.2	12.9	7.6
4	3	3	90	60	5.50	0.011	110	50	4.50	0.009	13.1	20.7	9.7
5	3	1	90	60	5.50	0.022	110	50	4.50	0.018	9.0	15.2	8.5
6	2	3	90	60	5.50	0.033	110	50	4.50	0.027	6.6	11.5	8.0
7	1	2	90	60	10.45	0.011	110	50	8.55	0.009	8.0	12.2	10.4
8	3	1	90	60	10.45	0.022	110	50	8.55	0.018	6.7	10.7	9.5
9	2	3	90	60	10.45	0.033	110	50	8.55	0.027	5.5	9.1	8.9

I	22.7	27.7				T=77.7
II	22.2	25.5				
III	28.8	24.5				

5.质量特性值的计算

由综合误差因素各水平所对应的误差因素水平组合及式 (7·2·2) 可计算出内表各号试验的 N_1 , N_3 条件下的质量特性值 Y_{N_1} , Y_{N_3} 。如对内表第一号试验, 有

$$Y_{N_1} = \frac{90}{\sqrt{0.55^2 + (2\pi \times 60 \times 0.11)^2}} = 21.5 \text{ (A)}$$

6.SN 比的计算

由于本例属望目特性, 故根据望目特性 SN 比计算公式求得内表各号试验 η 值, 如对于第一号试验:

$$S_m = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2 = \frac{1}{2} (21.5 + 38.4)^2 = 1794.005$$

$$V_e = \frac{1}{n-1} \left[\sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2 \right] = \frac{1}{2-1} (21.5^2 + 38.4^2 - 1794.005) = 142.805$$

$$\eta = 10 \lg \frac{\frac{1}{n} (S_m - V_e)}{V_e} = 10 \lg \frac{1794.005 - 142.805}{2 \times 142.805} = 7.6(\text{dB})$$

其余各号试验的 η 值可参看表 7-9 最后一列。

7.内表的方差分析与显著性检验

仿照例 7-1 关于方差的计算方法, 可求得如表 7-10 的方差分析表。

表 7-10 方差分析表

方差来源	S	f	V	F	临界值		显著性
					$F_{0.05}(2, 4)$	$F_{0.01}(2, 4)$	
R	2.25	2	3.125	14.21	6.9	18.0	*
L	1.79	2	0.895	4.07			
e	0.88	4	0.220				
T	8.92	8					

方差分析结果表明 R 对电路输出电流稳定性影响较大, L 没什么影响。

8.最宜条件的确定

根据 SN 比越打越好, 及方差分析结果, 得出最宜参数组合为 R_3 、 L_1 。此方案对应于内表的第 7 号试验, 与直观按 SN 比最大选取结果一致。事实上, 本例的内设计对 R、L 来说是全部搭配试验, 故可以不作方差分析, 而直接由 η 值来选择。

9.最宜条件工序平均值估计

一组条件的工序平均值估计是指在这组条件下, 试验指标可能有的一种估计值或预测值。它等于总的平均指标值加上显著因素或交互作用的效应估计值, 此时把不显著因素归入误差。对于本例有:

$$\bar{\eta}_{R_3} = \bar{T} + (\bar{\eta}_{R_3} - \bar{T}) = \bar{\eta}_{R_3} = 9.6(\text{dB})$$

其中 $\bar{\eta}_{R_3} = \text{III}_R / r$, $\bar{T} = (I_R + \text{II}_R + \text{III}_R) / N$; r : 内表水平重复次数; N : 内表试验次数。

7.3 望小、望大特性的参数设计

例 7-3 某企业为改善水泵阀头滑动部位的耐磨性能。选取磨损量作为质量特性进行试验。

1.确定可控因素及其水平表

根据阀头结构及其实际使用情况，所选的可控因素有：阀头材料 A、负载 B、光洁度 C、润滑油 D 和阀体材料 E。因素水平表如表 7-11 所示。

表 7-11 可控因素水平表

因素 水平	A	B	C	D	E
1	现用的	现用的	现用的	现用的	现用的
2	新的	新的	新的	新的	新的

该企业为保密起见，没有提供可控因素各水平的具体内容。

根据实际经验还知，A 与 B、A 与 C 之间可能存在交互作用，要求在试验时作进一步证实。

2. 内设计

利用正交表 $L_8(2^7)$ 作为内表。把 A、B、C、D、E 分别配列于第 1、2、4、6、7 列，交互作用 A×B、A×C 置于第 3、5 列，具体可参见表 7-12。

1. 误差因素及其水平

本例仅考虑一个误差因素：部位 R 为水平 8，即表示 8 个部位。

4. 试验结果及 SN 比计算

对内表每号试验条件，分别测定 8 个部位的磨损 $y(\mu m)$ ，具体结果列于表 7-12 的第 9 至 16 列。

由试验目的知，本例属望小特性，根据望小特性 SN 比计算公式 $(7 \cdot 2 \cdot 14)$ ，可算出每号试验所对应的 η 值。例如，第 1 号试验的 η 值为：

$$\eta_1 = -10 \lg \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 = -10 \lg \frac{1}{8} (12^2 + 12^2 + \dots + 20^2) = -21.9 (dB)$$

仿此可算得其他各号试验的 SN 比 η 。具体列于表 7-12 最后一列。

表 7-12 内设计表

试验号	1	2	3	4	5	6	7	磨损量 $y(\mu m)$								η (dB)
	A	B	A×B	C	A×C	D	E	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	R ₆	R ₇	R ₈	
1	1	1	1	1	1	1	1	12	12	10	13	3	3	16	20	-21.9
2	1	1	1	2	2	2	2	6	10	3	5	3	4	20	18	-20.6
3	1	2	2	1	1	2	2	9	10	5	4	2	1	3	2	-14.8
4	1	2	2	2	2	1	1	8	8	5	4	3	4	9	9	-16.5
5	2	1	2	1	2	1	2	16	14	8	8	3	2	20	33	-24.2
6	2	1	2	2	1	2	1	18	26	4	2	3	3	7	10	-21.7
7	2	2	1	1	2	2	1	14	22	7	5	3	4	19	21	-21.0
8	2	2	1	2	1	1	2	16	13	5	4	11	4	14	30	-21.3
I	-73.8	-88.4	-88.8	-83.9	-81.7	-85.9	-83.1									T=-166.0
II	-92.2	-77.6	-77.2	-82.1	-84.3	-80.1	-82.9									

5. 方差分析与显著性检验

参照 6.2 计算平方和方法，由表 7-12 可得出方差分析表 7-13。

表 7-13 方差分析表

方差来源	S	f	V	F	临界值		显著性
					$F_{0.05}(1, 3)$	$F_{0.01}(1, 3)$	
A	42.32	1	42.32	101.49	10.13	31.2	* *
B	14.58	1	14.58	34.96			* *
A×B	16.82	1	16.82	40.43			* *
C	0.41△	1	—				
A×C	0.84△	1	—				
D	4.21	1	4.21	10.10			
E	0.00△	1	—				

e	0.00	0					
(e)	(1.25)	(3)	(0.417)				
T	79.18						

其中交互作用 A×B 的自由度等于 A 与 B 的自由度之积，A×C 的自由度同理类推。表中“△”表示 C、A×C 及 E 的效应很小，由对应于 e 的 $S_e=0$ ，这样不利于分析。故把 C、A×C、E、e 项的波动合并为一项并记为 (e)，其自由度为 $f_{(e)}=f_e+f_{A\times C}+f_E+f_e=3$

方差分析结果表明：A、B、A×B 效应特别显著；因素 D 的 F 值与临界值 10.13 较接近。为慎重起见，把 D 也列入显著因素加以考虑。

2. 最宜条件的确定

由于 A×B 显著，故 A、B 的最宜水平应通过二元表 7-14 加以确定，根据以上分析结果及表 5-14，得最宜水平组合为 A₁B₂C₀D₂E₀，C₀、E₀ 表示因素 C、E 水平可根据实际需要选定。

表 5-14

B	B ₁	B ₂
A		
A ₁	-42.5	-31.3
A ₂	-45.9	-42.3

7. 最宜条件工序平均值估计

由于交互作用 A×B 效应显著，故最宜条件 A₁B₂C₀D₂E₀ 的工序平均值估计为

$$\begin{aligned}\hat{\eta}_{\text{宜}} &= \bar{T} + (\bar{\eta}_{A_1} - \bar{T}) + (\bar{\eta}_{B_2} - \bar{T}) + [(\bar{\eta}_{A_1 B_2} - \bar{T}) - (\bar{\eta}_{A_1} - \bar{T}) - (\bar{\eta}_{B_2} - \bar{T})] + (\bar{\eta}_{D_2} - \bar{T}) \\ &= \bar{\eta}_{A_1 B_2} + \bar{\eta}_{D_2} - \bar{T} = -\frac{31.3}{2} + \frac{-80.1}{4} - \left(-\frac{166.0}{8}\right) = -14.93(\text{dB})\end{aligned}$$

现用条

件 A₁B₁C₁D₁E₁ 的工序平均值估计为：

$$\begin{aligned}\hat{\eta}_{\text{现}} &= \bar{T} + (\bar{\eta}_{A_1} - \bar{T}) + (\bar{\eta}_{B_1} - \bar{T}) + [(\bar{\eta}_{A_1 B_1} - \bar{T}) - (\bar{\eta}_{A_1} - \bar{T}) - (\bar{\eta}_{B_1} - \bar{T})] + (\bar{\eta}_{D_1} - \bar{T}) \\ &= \bar{\eta}_{A_1 B_1} + \bar{\eta}_{D_1} - \bar{T} = -\frac{42.5}{2} - \frac{85.9}{4} + \frac{166.0}{8} = -21.98(\text{dB})\end{aligned}$$

最宜条件

与现用条件比较，所获得增益估计为：

$$\Delta\eta = \hat{\eta}_{\text{宜}} - \hat{\eta}_{\text{现}} = -14.93 + 21.98 = 7.05(\text{dB})$$

例 7-4 探求胀裂剂生产的最佳工艺条件。胀裂剂是一种新型的破碎材料，其性能指标是膨胀力大小，膨胀力越大，表示性能越好。今以膨胀力 y (MPa) 作为质量特性进行参数设计，具体过程如下：

1. 确定可控因素及其水平表

根据各因素对膨胀力影响大小的试验分析，选取如下因素作为可控因素：调节剂加入量 A、活性剂加入量 B、无机盐加入量 C、辅料加入量 D。

现以设计人员感兴趣的一组成份配比：A：1.0%，B：0.5%，C：0.8%，D：10.0%，其余为主料，作为第二水平，按±50%的变化量确定可控因素的水平表 7-15。

表 7-15 可控因素水平表

因素	A (%)	B (%)	C (%)	D (%)
水平				
1	1.5	0.75	1.2	15
2	1.0	0.50	0.8	10
3	0.5	0.25	0.4	5

2. 内设计

根据经验可知，因素间的交互作用可不考虑，现选 L₉ (3⁴) 作内表，把 A、B、C、D 配列于第 1、2、3、4 列，具体见表 7-16。

表 7-16 内设计表

列号	1	2	3	4	N ₁	N ₂	η _i ' = η _i -28
----	---	---	---	---	----------------	----------------	---------------------------------------

试验号	A	B	C	D	Y ₁₁	Y ₁₂	
1	1(1.5%)	1(0.75%)	1(1.2%)	1(15%)	30	32	1.81
2	1	2	2	2	34	36	2.87
3	1	3	3	3	18	20	-2.46
4	2(1.0%)	1	2(0.8%)	3	20	22	-1.58
5	2	2(0.5%)	3	1	30	31	1.68
6	2	3	1	2(10%)	32	32	2.10
7	3(0.5%)	1	3(0.4%)	2	31	33	2.09
8	3	2	1	3(5%)	18	19	-2.67
9	3	3(0.25%)	2	1	32	34	2.36
I	2.22	2.32	1.24	5.85			T' = 2.20
II	2.20	1.88	3.65	7.06			
III	1.78	2.00	1.31	- 6.71			

1. 误差因素及其水平

为减少试验次数，对内表的每号条件，采用综合误差因素法进行试验。根据试验目的，本问题属望大特性的参数设计，故综合误差因素 N 的水平只能选两个：

N₁：负侧最坏条件；N₂：标准条件

内表每号条件在 N₁、N₂ 条件下所测得的膨胀力数据列于表 7-16 的第 6、7 列。

4. SN 比的计算

根据公式 (7·2·15)，可算得内表各号试验 η 值，如第 1 号：

$$\eta_1 = -10 \lg \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} = -10 \lg \frac{1}{2} \left(\frac{1}{30^2} + \frac{1}{32^2} \right) = 29.81(dB)$$

为简化计算，把 η_i 减去 28，所得 η_i' 列于表 7-16 最后一列。

5. 方差分析与显著性检验

$$\frac{6.20^2}{9} = 4.27$$

记 CT = 9，则 $S_T = (1.81^2 + 2.87^2 + 2.36^2) - CT = 40.09$

根据可控因素波动平方和计算公式

$$(\text{I}^2 + \text{II}^2 + \text{III}^2) / 3 - CT = 3 (\text{I}^2 + \text{II}^2 + \text{III}^2) / N - (\text{I} + \text{II} + \text{III})^2 / N$$

可得 S_A=0.04, S_B=0.03, S_C=1.26, S_D=38.72.

根据以上结果，可得方差分析表 7-17。

表 7-17

方差来源	S	f	V	F	临界值		显著性
					F _{0.05} (2, 4)	F _{0.01} (2, 4)	
A	0.04△	2	—				
B	0.03△	2	—				
C	1.26	2	0.63				
D	38.76	2	19.38	36	6.94	18.00	* *
e	0	0		1107.43			* *
(e)	(0.07)	(4)	(0.0175)				
T	40.09	8					

2. 最宜工艺条件的确定

由方差分析结果知，因素 C 与 D 特别显著，因素 A、B 对质量特性 y 的影响不大。再根据表 7-16，得出最宜工艺条件为 A₀B₀C₂D₂，A₀、B₀ 表示可根据实际需要确定。

7.4 动态特性的参数设计

动态特性参数设计的一般程序是：在明确质量特性的基础上，把因素分成内侧因素（即安排在内表的

因素)和外侧因素(即安排在外表的因素),内侧因素除可控因素外,还可包括标示因素;外侧因素除误差因素外,还可包括信号因素。然后根据外表数据求出每一因素水平组合的效应,再根据因素效应计算与分析 SN 比,以求出实现动态特性要求的最宜条件。

现以印染工艺参数设计为例,介绍动态特性参数设计的一般方法。

例 7-5 纺织品印染作业表明,纺织品的着色度受染料用量比、纺织品清洁度、纺织品支数与股数、印染水质、搅拌方法、印染温度等因素的影响。如何选择一组最佳因素水平,以保证纺织品的着色特性达到预期的目标值,这就是一个动态特性的参数设计问题。此处纺织品着色度是动态特性,信号因素是染料的用量比。

1.因素分类

(1) 可控因素及其水平表

根据专业技术的分析结果,共选五个可控因素,各因素的水平数为 2,如表 7-18 所示。

表 7-18 可控因素水平表

因素 水平	燃料种类 A	印染温度 B	芒硝量 C	pH 值 D	浴比 E
1	新颜料	常温	原用量的一半	原有值-0.5	原有值逾 2 倍
2	现用颜料	高温	原用量	原有值	原有值

另据经验判断,还须考察交互作用 B×E 和 C×E。

(2) 标示因素

本例的标示因素是染色浓度 R,共取 3 个水平:

$R_1=0.1\%wf$ (低浓度), $R_2=1.0\%wf$ (中浓度), $R_3=10\%wf$ (高浓度)

为简单起见,本例把标示因素固定在中浓度水平。

(3) 信号因素

此处选取颜料用量比即颜料占印染纺织品重量的百分比 M 作为信号因素,它的 3 个水平为

$$M_1 = \frac{1}{3}\%, M_2 = 1\%, M_3 = 3\%$$

(4) 误差因素

本例的误差因素有纺织品的纱支数、股数、带浆度(带浆与否)、印染水质等,为简化计算,这里仅取带浆度 K 作为误差因素,其水平数为 2,即 K_1 表示不带浆, K_2 表示带浆。

2. 设计与试验

选正交表 $L_8(2^7)$ 作内表,把 B、E、B×E、C、A、C×E、D 分别配列于内表的第 1 至 7 列,具体见表 7-19。

将信号因素 M 和误差因素 K 配列于外表,得外设计。此处外表试验采用全部试验。内表的每号试验条件配上外表,得内表与外表的直积表 7-19。由于信号因素取 3 个水平,误差因素取 2 个水平,故对内表每号条件可得 6 个数据。为提高分析结果的可靠性,采用重复试验,即直积表的每号条件都采用 2 匹布进行试验。有关试验结果列于表 7-19 的数据栏内。

表 7-19 直积表

试 验 号	内表							外表						η (dB)
	B	E	B×E	C	A	C×E	D	M ₁		M ₂		M ₃		
	1	2	3	4	5	6	7	K ₁	K ₂	K ₁	K ₂	K ₁	K ₂	
1	1	1	1	1	1	1	1	5.2	5.9	12.3	12.4	22.4	22.5	13.6
								5.6	5.8	12.1	12.5	22.6	22.2	
2	1	1	1	2	2	2	2	2.0	5.9	14.4	15.4	27.8	28.3	13.1
								5.7	6.0	14.8	14.4	26.9	28.8	
3	1	2	2	1	1	2	2	5.1	5.5	10.5	10.9	17.8	18.4	12.0
								5.4	5.8	10.6	10.8	17.2	18.3	
4	1	2	2	2	2	1	1	6.4	6.4	15.5	16.0	29.0	29.7	13.0
								6.7	5.8	14.9	15.8	28.3	31.1	

5	2	1	2	1	2	1	2	5.1	5.4	12.1	11.6	25.2	25.5	19.4
								5.4	5.5	12.9	11.7	24.8	25.7	
6	2	1	2	2	1	2	1	6.4	6.9	14.8	15.0	31.0	32.5	18.3
								6.6	6.6	15.0	15.0	31.3	31.4	
7	2	2	1	1	2	2	1	5.5	5.9	11.8	13.6	23.2	24.0	13.4
								5.5	6.0	12.4	13.2	23.6	25.4	
8	2	2	1	2	1	1	2	6.8	6.8	15.9	15.9	31.8	31.4	14.8
								6.6	6.5	16.3	16.7	31.7	32.4	
I	51.7	64.4	54.9	58.4	58.7	60.8	58.3							T=117.6
II	65.9	51.2	62.7	59.2	58.9	56.8	59.3							

3. SN 比的计算

由于本例信号因素水平非等间隔,故对内表的每号条件,只能采用共识(7·2·22)计算其 SN 比 η 。如对内表的第 1 号条件,由

$$M_1 = \frac{1}{3}, M_2 = 1, M_3 = 3; r = 4 \quad \text{得} \quad \bar{M} = \frac{\frac{1}{3} = 1 + 3}{3} = \frac{13}{9}$$

$$y_{1.} = 5.2 + 5.6 + 5.9 + 5.8 = 22.5 \quad y_{2.} = 12.3 + 12.4 + 12.1 + 12.5 = 49.3$$

$$y_{3.} = 22.4 + 22.5 + 22.6 + 22.2 = 89.7 \quad y_{..} = 22.5 + 49.3 + 89.7 = 161.5$$

$$S_{MM} = r \sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2 = 4[(\frac{1}{3} - \frac{13}{9})^2 + (1 - \frac{13}{9})^2 + (3 - \frac{13}{9})^2] = \frac{416}{27}$$

$$S_T = 5.2^2 + 5.6^2 + \cdots + 22.5^2 + 22.2^2 - \frac{161.5^2}{12} = 572.65$$

$$S_\beta = \frac{1}{S_{MM}} [\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M}) y_{i.}]^2 = \frac{27}{416} (-\frac{10}{9} \times 22.5 - \frac{4}{9} \times 49.3 + \frac{14}{9} \times 89.7)^2 = 556.80$$

$$Ve = \frac{S_T - S_\beta}{rn - 2} = \frac{572.65 - 556.80}{4 \times 3 - 2} = 1.585$$

$$\eta_1 = 10 \lg \frac{27 \times (556.80 - 1.585)}{1.585 \times 416} = 13.6(dB)$$

同理可算出内表其它试验号的 SN 比 η 。

4. 方差分析与显著性检验

根据内表 $L_8(2^7)$ 各列平方和与自由度算法,求得方差分析表 7-20。方差分析结果表明 B、E、B×E 特别显著, C×E 显著, 其余均不显著

表 7-20 方差分析表

方差来源	S	f	V	F	临界值		显著性
					$F_{0.05}(1, 3)$	$F_{0.01}(1, 3)$	
B	25.2	1	25.20	360	10.13	31.2	* *
E	15.68	1	15.68	224			* *
B×E	7.61	1	7.61	108.71			* *
C	0.08△	1	—				
A	0.00△	1	—				
C×E	2.00	1	2.00	28.57			*
D	0.13△	1	—				
e	0	0	—				
(e)	(0.21)	(3)	(0.07)				
T	50.70	7					

5. 最宜条件的确定

由于 B、E、B×E、
最宜水平为 B₂、C₁、E₁，
现有水

C ₁	33.0	25.4
C ₂	31.4	27.8

C×E 显著，根据二元表 7-21，7-22 知 B、C、E 的
故最宜条件是 A₂B₂C₁D₂E₁。其中 A₂、D₂ 表示采用

表

5-21

表 5-22

B ₁	26.7	25.0
B ₂	37.7	28.2

2. 最宜条件工序平均值估计

根据工序平均值估计公式，知

$$\begin{aligned}\hat{\eta}_{\text{宜}} &= \bar{T} + (\bar{\eta}_{B_2} - \bar{T}) + (\bar{\eta}_{E_1} - \bar{T}) + [\bar{\eta}_{B_2 E_1} - (\bar{\eta}_{B_2} - \bar{T}) - (\bar{\eta}_{E_1} - \bar{T})] + [\bar{\eta}_{C_1 E_1} - (\bar{\eta}_{C_1} - \bar{T}) \\ &\quad - (\bar{\eta}_{E_1} - \bar{T}) - \bar{T}] = \bar{\eta}_{B_2 E_1} + \bar{\eta}_{C_1 E_1} - \bar{\eta}_{C_1} - \bar{\eta}_{E_1} + \bar{T} \\ &= \frac{37.7}{2} + \frac{33.0}{2} - \frac{58.4}{4} - \frac{64.4}{4} + \frac{117.6}{8} \\ &= 19.35(\text{dB})\end{aligned}$$

关于

其他情形的动态特性的参数设计，在此不作进一步介绍，有兴趣可参阅有关著作。

7.5 容许差设计

如前所述，容许差设计是在参数设计以后，针对有主要影响的误差因素，选择波动小的优质零部件，以达到衰减质量特性值的波动。容许差设计虽然会起到减少质量特性值波动的作用，但由于采用优质品零部件也带来成本的增加，因此得通过综合社会效益来考虑是否有必要对有主要影响的零部件给有较小的容许差。本节仍主要以实例说明容许差设计的一般方法。

7.5.1 容许差的决定方法

1. 根据功能界限 Δ_0 ，确定容许差

设已知用户对产品的容许差要求（功能界限）为 Δ_0 ，产品丧失功能时的损失为 A_0 ，由第四章第三节关于质量损失函数的讨论知道，要保持生产方和用户损失的平衡，必须

$$\frac{A}{\Delta^2} = \frac{A_0}{\Delta_0^2} \quad (7 \cdot 5 \cdot 1)$$

其中 Δ 为产方的生产容许差。

由 (5·5·1) 得

$$\Delta = \sqrt{\frac{A}{A_0}} \Delta_0 \quad (7 \cdot 5 \cdot 2)$$

例 7-6 已知用户对产品的容许差要求为 $\Delta_0=0.2$ ，产品丧失功能的损失为 $A_0=40$ 元，企业生产一个不合格品的损失是 $A=12$ 元，则该产品的生产容许差为：

$$\Delta = \sqrt{\frac{A}{A_0}} \Delta_0 = \sqrt{\frac{12}{40}} \times 0.2 = 0.1$$

2. 根据上位特性的容许差决定下位特性的容许差

当产品的质量特性是取决于两种特殊的特性时，即上位特性（产品本身的质量特性）和下位特性（产品的零部件或子系统的特性）。如何根据已知的上位特性容许差来确定下位特性的容许差呢？

设上位特性 y 与下位特性 x 之间存在着简单的线性关系。

$$y = \beta_0 + \beta_1 x \quad (7 \cdot 5 \cdot 3)$$

记 Δ_{0y} ——上位特性的功能界限；

A_{0y} ——产品丧失功能时的损失；

Δ_y ——上位特性的容许差；

A_y ——产品不合格时的损失；

Δ_x ——下位特性的容许差；

A_x ——下位特性不合格时导致产品的损失；

m_y ——上位特性的目标值；

m_x ——下位特性的目标值。

假设 m_y 与 m_x 满足式(5·5·3)，且 y 为望目特性，则上位特性的损失函数为

$$\begin{aligned} L(y) &= \frac{A_{0y}}{\Delta_{0y}^2} (y - m_y)^2 \\ &= \frac{A_{0y}}{\Delta_{0y}^2} [(\beta_0 + \beta_1 x) - (\beta_0 + \beta_1 m_x)]^2 \\ &= \frac{A_{0y}}{\Delta_{0y}^2} (\beta_1 x - \beta_1 m_x)^2 \\ &= \frac{A_{0y}}{\Delta_{0y}^2} \beta_1^2 (x - m_x)^2 \end{aligned}$$

另由
$$L(x) = \frac{A_x}{\Delta_x^2} (x - m_x)^2$$
，得

$$\frac{A_x}{\Delta_x^2} = \frac{A_{0y}}{\Delta_{0y}^2} \beta_1^2$$

即

$$\Delta x = \sqrt{\frac{A_x}{A_{0y}}} \cdot \frac{\Delta_{0y}}{\beta_1} \quad (7 \cdot 5 \cdot 4)$$

同理可导出如下关系式

$$\Delta x = \sqrt{\frac{A_x}{A_y}} \cdot \frac{\Delta y}{\beta_1} \quad (7 \cdot 5 \cdot 5)$$

例 7-7 已知用钢板冲压某种产品时，钢板的厚度对冲压件有可计算的影响；当钢板厚度变化 $1 \mu\text{m}$ 时，冲压件的尺寸变化 $6 \mu\text{m}$ ；设冲压件的标准为 $m_0 \pm 300 \mu\text{m}$ ，每个冲压件不合格时所引起的损失为120元，当钢板的厚度超标准时，作次品处理时的损失为30元/件。试确定钢板厚度下位特性的容许差。

解：记 y 为冲压件的尺寸， x 为钢板的厚度。则依题意有 $\Delta_y=300$ ， $A_y=120$ ， $A_x=30$ ，

$\beta_1=6$ ，由式(7·5·5)得

$$\Delta x = \sqrt{\frac{A_x}{A_y}} \cdot \frac{\Delta y}{\beta_1} = \sqrt{\frac{30}{120}} \times \frac{300}{6} = 25(\mu\text{m})$$

1. 劣化特性容许差的决定方法

劣化特性是指特性的取值随时间变化向同一方向变化。

对于像机械零件、塑料制品等在使用过程中，随时间推移出现的渐渐磨损、劣化现象，一般统称为劣化；从质量特性角度看，劣化现象表现为质量特性也称作劣化特性。显然，规定劣化特性的出厂标准，对于提高产品的可靠性具有重要意义。

由于劣化特性与时间因素有关，故劣化特性的容许差一定是时间的函数。

例 7-8 记某产品的尺寸为 y ，其目标值为 m ，设计寿命为10年。已知 $\Delta_0=300 (\mu\text{m})$ ， $A_0=4500$ 元，出厂前检查为不合格时损失为60元。当产品出厂的质量特性值 $y=m$ 时，试确定平均每年磨损量 θ 的容许差。

解：由望目特性的质量损失函数(7·3·3)得

$$L(y) = \frac{4500}{300^2} (y - m)^2$$

当产品使用 t 年以后，则 $y(t) = m - t\theta$ 。

$$L(y(t)) = \frac{4500}{300^2} (m - t\theta - m)^2 = \frac{4500}{300^2} (\theta t)^2$$

此时

十年内由于劣化造成的平均损失为

$$\bar{L}(y) = \frac{1}{10} \int_0^{10} L(y) dt = \frac{1}{10} \frac{4500}{300^2} \int_0^{10} \theta^2 t^2 dt = \frac{4500}{300^2} \times \frac{100}{3} \theta^2$$

根据用户和厂方利益平衡关系，有

$$60 = \frac{4500}{300^2} \times \frac{100}{3} \times \theta^2$$

即

$$\theta = \sqrt{\frac{60 \times 300^2 \times 3}{4500 \times 100}} = 6(\mu m)$$

结果表明，该产品平均每年允许磨损 $6 \mu m$ ，10 年累计超过 $60 \mu m$ ，即为不合格品。

对于具有劣化特性的产品，为提高其使用寿命，常在设计时提高其初始值，使其在使用 N 年后的质量特性值等于 m ，即初始值为 $m + N\theta$ 。

对于例 7-8，若设 $N=5$ 年，则使用 t 年后有 $y = m + N\theta - t\theta$ ，故有

$$L(y) = \frac{4500}{300^2} (5\theta - t\theta)^2 = \frac{4500}{300^2} (5 - t)^2$$

十年期间因磨损所造成的年平均损失为

$$\bar{L}(y) = \frac{1}{10} \int_0^{10} L(y) dt = \frac{4500}{10 \times 300^2} \theta^2 \int_0^{10} (5 - t)^2 dt = \frac{4500}{300^2} \times \frac{25}{3} \theta^2$$

故有

$$\theta = \sqrt{\frac{60 \times 300^2 \times 3}{25 \times 4500}} = \frac{300}{25} = 12(\mu m)$$

即年平均允许磨损 $12 \mu m$ ，10 年累计可达 $120 \mu m$ 。

7.5.2 多因素容许差设计

以上介绍的仅是较为简单情形的容许差设计。对于影响质量特性波动因素较多，且这些因素与质量特性之间关系又较为复杂的情况，一般是采用多因素容许差设计方法。当误差因素水平是等间隔时，时常借助于正交多项式回归进行效应分析。

以惠斯登电桥为例，在参数设计的基础上接着进行容许差设计。

1. 参数设计的最宜方案

由前面参数设计结果知，最宜方案是：

$A=20(\Omega)$ ， $C=10(\Omega)$ ， $D=10(\Omega)$ ， $E=30(\Omega)$ ， $F=2(\Omega)$ 。电阻与电动势均采用三级品。

2. 确定最宜条件的误差因素水平表

以最宜条件各元件的参数值为中心值，按三级品各元件的波动幅度大小列出最宜条件的误差因素水平表 7-23。

表 7-23 误差因素水平表

因素	A	B	C	D	E	F	X
水平							
1	19.94	1.994	9.97	9.97	28.50	1.994	-0.0002
2	20.00	2.00	10.00	10.00	30.00	2.00	0
3	20.06	2.006	10.03	10.03	31.50	2.006	0.0002
波动	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	5%	0.3%	± 0.0002

3. 外设计

选用正交表 $L_{36}(3^{13})$ 作外表，将误差因素 A、B、C、D、E、F、X 按顺序上列。根据式 $(7 \cdot 2 \cdot 1)$ ，

可计算出各号条件的 y 值，仍记 $y' = y - 2$ ，具体结果如表 7-24 所示。

表 7-24

列号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	最宜条件
试验号	A	B	C	D	E	F	X							$y' = y - 2$
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-0.0037
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	0.0000
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	0.0039
4	1	1	1	1	2	2	2	3	3	3	3	3	1	-0.0060
5	2	2	2	2	3	3	3	1	1	1	1	1	1	-0.0021
6	3	3	3	3	1	1	1	2	2	2	2	2	1	0.0083
7	1	1	2	3	1	2	3	1	1	2	2	3	1	-0.0024
8	2	2	3	1	2	3	1	2	2	3	3	1	1	-0.0098
9	3	3	1	2	3	1	2	3	3	1	1	2	1	0.0120
10	1	1	3	2	1	3	2	3	2	1	3	2	1	-0.0120
11	2	2	1	3	2	1	3	1	3	2	1	3	1	0.0098
12	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	2	1	1	0.0021
13	1	2	3	1	3	2	1	3	3	2	1	2	2	-0.0099
14	2	3	1	2	1	3	2	1	1	3	2	3	2	0.0120
15	3	1	2	3	2	1	3	2	2	1	3	1	2	-0.0023
16	1	2	3	2	1	1	3	2	3	3	2	1	2	-0.0083
17	2	3	1	3	2	2	1	3	1	1	3	2	2	0.0203
18	3	1	2	1	3	3	2	1	2	2	1	3	2	-0.0120
19	1	2	1	3	3	3	1	2	2	1	2	3	2	0.0142
20	2	3	2	1	1	1	2	3	3	2	3	1	2	0.0000
21	3	1	3	2	2	2	3	1	1	3	1	2	2	-0.0142
22	1	2	2	3	3	1	2	1	1	3	3	2	2	0.0060
23	2	3	3	1	1	2	3	2	2	1	1	3	2	-0.0083
24	3	1	1	2	2	3	1	3	3	2	2	1	2	0.0022
25	1	3	2	1	2	3	3	1	3	1	2	2	3	-0.0022
26	2	1	3	2	3	1	1	2	1	2	3	3	3	-0.0099
27	3	2	1	3	1	2	2	3	2	3	1	1	3	0.0120
28	1	3	2	2	2	1	1	3	2	3	1	3	3	0.0082
29	2	1	3	3	3	2	2	1	3	1	2	1	3	-0.0060
30	3	2	1	1	1	3	3	2	1	2	3	2	3	-0.0023
31	1	3	3	3	2	3	2	2	1	2	1	1	3	0.0060
32	2	1	1	1	3	1	3	3	2	3	2	2	3	-0.0081
33	3	2	2	2	1	2	1	1	3	1	3	3	3	0.0023
34	1	3	1	2	3	2	2	3	1	2	3	1	3	0.0090
35	2	1	2	3	1	3	1	2	3	3	1	2	3	0.0023
36	3	2	3	1	2	1	2	3	1	1	2	3	3	-0.0120
I	-0.0002	-0.0721	0.0723	-0.0722	-0.0001	0.0000	0.0266							Y=0.0000
II	0.0002	-0.0001	-0.0001	0.0001	0.0000	-0.0002	0.0000							
III	0.0000	0.0722	-0.0722	0.0721	0.0001	0.0002	-0.0266							

4. 方差分析与显著性检验

为了了解各误差因素效应大小以及它们是以何种形式对质量特性进行影响，必须求出个因素的效应平方和及一次、二次分解、并进行方差分析与显著性检验。

首先列出波动平方和的分解式

$$S'_T = \sum_{i=1}^n (y_i - m)^2 = n(\bar{y} - m)^2 + \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = S_m + S_T$$

其中 $S_T = S_A + S_B + S_C + S_D + S_E + S_F + S_X + S_e$

由于各误差因素的水平是等间隔的，由一元正交多项是回归知

$$S_A = S_{Al} + S_{Aq}, S_B = S_{Bl} + S_{Bq}, S_C = S_{Cl} + S_{Cq}, S_D = S_{Dl} + S_{Dq},$$

$$S_E = S_{El} + S_{Eq}, S_F = S_{Fl} + S_{Fq}, S_X = S_{Xl} + S_{Xq},$$

以上各符号的意义是： S_T' 表示 y 偏离目标值所引起的平方和； S_m 为平均值波动平方和，它表示质量特性平均值偏离目标值的多少； $S_{\cdot l}$ ， $S_{\cdot q}$ 分别表示误差因素一次、二次效应平方和，它们分别反映误差因素一次、二次效应的影响大小；当因素的水平为等间隔时， $S_{\cdot l}$ 、 $S_{\cdot q}$ 可由下式求得：

$$S_{\cdot l} = \frac{(\sum W_i \eta_{\cdot i})^2}{\gamma(\lambda^2 S)}, \quad W_i \text{ 为表 6-1 的线性系数, 且 } f.l=1$$

$$S_{\cdot q} = \frac{(\sum W_i \eta_{\cdot i})^2}{\gamma(\lambda^2 S)}, \quad W_i \text{ 为表 6-1 的二次系数, 且 } f.q=1$$

其中 γ 表示 n 次试验中水平的重复数， $\eta_{\cdot i}$ 表示该因素取第 i 水平时所对应的全部试验结果之和。

$$\text{如: } S_{Bl} = (\text{III}_B - \text{I}_B)^2 / (12 \times 2) = \frac{(0.0722 + 0.0721)^2}{12 \times 2} = 86760 \times 10^{-8}$$

$$S_{Bq} = (\text{III}_B - 2\text{II}_B + \text{I}_B)^2 / (12 \times 2) = \frac{(0.0722 + 2 \times 0.0001 - 0.0721)^2}{12 \times 2} = 1 \times 10^{-9} \approx 0$$

同理可求得

$$S_{Al} = 0, S_{Aq} = 0, S_{Cl} = 87001 \times 10^{-8}, S_{Cq} = 0,$$

$$S_{Dl} = 86760 \times 10^{-8}, S_{Dq} = 0, S_{El} = 0, S_{Eq} = 0,$$

$$S_{Fl} = 0, S_{Fq} = 0, S_{Xl} = 11793 \times 10^{-8}, S_{Xq} = 0$$

根据

$$S'_T = (y'_1)^2 + (y'_2)^2 + \cdots + (y'_{36})^2 = (-0.0037)^2 + (0.0000)^2 + \cdots + (-0.0120)^2 = 272332 \times 10^{-8}$$

$$S_m = n(\bar{y} - m)^2 = n\bar{y}'^2 = \frac{1}{n}(\sum y'_i)^2 = 0$$

$$S_e = S_T - S_m - S_A - S_B - S_C - S_D - S_E - S_F - S_X = 18 \times 10^{-8}$$

表 7-25 方差分析表

方差来源	S	f	V	F	纯波动 S'	ρ (%)
M	0^{Δ}	1	—	—		
A {	0^{Δ}	1	—	—		
q	0^{Δ}	1	—	—		
B {	86760×10^{-8}	1	86760×10^{-8}	154928.57	86759.44×10^{-8}	31.858
q	0^{Δ}	1	—	—		
C {	87001×10^{-8}	1	87001×10^{-8}	155358.93	87000.44×10^{-8}	31.947
q	0^{Δ}	1	—	—		
D {	86760×10^{-8}	1	86760×10^{-8}	154928.57	86759.44×10^{-8}	31.858
q	0^{Δ}	1	—	—		
E {	0^{Δ}	1	—	—		
q	0^{Δ}	1	—	—		

F	$\left\{ \begin{array}{l} 1 \\ q \end{array} \right.$	0^{Δ}	1	—			
X	$\left\{ \begin{array}{l} 1 \\ q \end{array} \right.$	0^{Δ}	1	—			
e		11793×10^{-8}	1	11793×10^{-8}	21058.93	11792.44×10^{-8}	4.330
(e)		0^{Δ}	1				
		18×10^{-8}	21				
		(18×10^{-8})	(32)	0.56×10^{-8}		20.24×10^{-8}	0.007
T		272332×10^{-8}	36			272332×10^{-8}	100

可得方差分析表 7-25。

由 $F_{0.05}(1, 32) = 1.5$, $F_{0.01}(1, 32) = 7.50$, 知因素 B、C、D、X 的一次效应特别显著, 其余均不显著。

由于容许差设计的需要, 在表 7-25 中同时列有纯波动 S' 及贡献率 ρ (%)。我们知道, 一般的效应平方和除反映本身影响外, 还含有误差。所谓效应纯波动是指除去误差效应外, 完全由效应本身影响所产生的波动, 它等于效应平方和减去其自由度与误差均方的乘积, 例如, 因素 B 的一次效应的纯波动 $S_{B1}' = 86760 \times 10^{-8} - 1 \times 0.56 \times 10^{-8} = 86759.44 \times 10^{-8}$ 。而 $S_e' = 18 \times 10^{-8} + 4 \times 0.56 \times 10^{-8} = 20.24 \times 10^{-8}$ 。显见, 所有纯波动之和 S_r'' 等于总的平方和 S_r' 。效应的贡献率即为纯波动在总波动中所占的比例, 它等于效应的纯波动除以总的波动再乘以 100, 由此可知贡献率大的效应应是较重要的效应。

5. 容许差设计

(1) 损失函数的建立

设惠斯登电桥测量电阻时的容许差 $\Delta = 0.5$ (Ω), 不合格时的损失 $A = 300$ 元, 则电桥的损失函数为

$$L(y) = \frac{300}{0.5^2} (y - 2)^2 = 1200(y - 2)^2$$

根据参数设计所用元器件均是三级品这一情况, 利用上述结果, 可得最宜条件下平均每件产品的质量损失估计值为

$$\bar{L}(y) = k \cdot \frac{S_r'}{n} = 1200 \times \frac{272332 \times 10^{-8}}{36} = 0.0908 \quad (\text{元})$$

(2) 容许差设计

由方差分析结果知, 电阻 A、F 的效应不显著, 因此 A、F 可使用三级品。对于效应显著的电阻 B、C、D 必须考虑是否采用高品位元件进行替代, 要解决这一问题, 得通过分析把元件换成高品位后质量损失的减少是否抵得过成本的增加。如果质量损失的减少大于成本的增加, 则换是有价值的, 否则则不换。然而计算平均损失时要用到均方偏差, 换成高品位元件后均方偏差要如何计算呢? 一般是将换前的均方偏差乘以换后元器件的贡献率与误差贡献率之和。若换前一次 (或二次) 效应的贡献率为 ρ , 用于替换的元件的波动是原来元件波动的 W 倍, 则换后一次 (或二次) 效应的贡献率为 $W^2 \rho$ (或 $W^4 \rho$)。例如, 若把电阻 B、C、D 均换为特级品, 电流表换成一级品, 由表 5-26 知换后的均方偏差为

$$\begin{aligned} V' &= V \left[\left(\frac{1}{10} \right)^2 (\rho_{B1} + \rho_{C1} + \rho_{D1}) + \left(\frac{1}{5} \right)^2 \rho_{X1} + \rho_{(e)} \right] \\ &= \frac{1}{36} \times 272332 \times 10^{-8} \left[\left(\frac{1}{10} \right)^2 \times (0.31858 + 0.31947 + 0.31858) + \left(\frac{1}{5} \right)^2 \times 0.04330 + 0.00007 \right] \\ &= 86 \times 10^{-8} \end{aligned}$$

从

而可算得换后平均每件产品的质量损失为

$$\bar{L}(y)' = kV' = 1200 \times 86 \times 10^{-8} = 0.00103$$

换后平均每件产品减少的质量损失为

$$\bar{L}(y) - \bar{L}(y)' = 0.0908 - 0.00103 = 0.0898 \quad (\text{元})$$

假设设计出的电桥是用来测量每年出产的 4000 个电阻, 电桥所用元件价目表如表 7-26 所示, 年利息及折旧率为 50%, 则 4000 个电阻一年获得的质量收益为

$$4000 \times 0.0898 = 359.2 \quad (\text{元})$$

而一年的成本增加量为

$$(3 \times 9 + 42) \times 0.5 = 34.5 \quad (\text{元})$$

由于年质量收益大于年成本增加量，故上述的替换方案是可取的。

作为一般化，上述问题可以逐一考虑效应显著的电阻、电流表的容许差设计，然后确定整体的替换方案，其计算过程与方法完全与上述类似，故不另加说明。

表 7-26

品级	波动与价格	电阻	电池	电流表
三级品	波动	$\pm 0.3\%$	$\pm 5\%$	± 0.2 毫安
	价格	1 元	4 元	8 元
二级品	波动	$\pm 0.15\%$	$\pm 2.5\%$	± 0.1 毫安
	价格	2 元	8 元	15 元
一级品	波动	$\pm 0.06\%$	$\pm 1\%$	± 0.04 毫安
	价格	5 元	20 元	50 元
特级品	波动	$\pm 0.03\%$	$\pm 0.5\%$	± 0.02 毫安
	价格	50 元	50 元	150 元

复习思考题

- 1、概述望目特性参数设计的基本过程（内外表法）。
- 2、完成参数设计以后，为什么经常还得进行容差设计？
- 3、已知对内表的实验结果统计如下（每水平重复 12 次，且各可控因素均为显著因素），试求水平条件 A_2 、 B_2 、 C_2 、 D_2 、 E_2 的工序平均值估计。

	A	B	C	D	E
I	378.7	172.6	251.0	68.0	315.0
II	224.9	254.8	254.3	221.7	251.7
III	80.9	257.1	179.2	394.8	117.8

- 4、选择题（部分答案可能不止一个）：
 - 1) 参数设计主要是利用质量特性与质量因素之间的（ ）。
A、一次效应和二次效应 B、非线性效应 C、线性效应
 - 2) 在某电路的参数设计中，已知试验结果的 SN 比值分别为 7.6, 7.5, 9.6, 8.5, 8.0, 10.4, 9.5, 8.9, 则总波动 S_T 及其对应的自由度分别是（ ）。
A、8.92 和 9 B、8.92 和 8 C、748.51 和 9
 - 3) 在内表为 3 因素二水平的参数设计中，若已知可控因素 A 与 B 交互作用显著，其二元表如下：

B	A1 A2	
A		
B_1	-40	-32
B_2	-17	-8

- 则 A 与 B 的最宜水平应选为_____。
- 4) 在容差设计中，若已知某元件一次效应的贡献率为 40%，现拟采用波动仅为原来的 0.3 倍的元件加以替换，则替换后其一次效应的贡献率为（ ）。

- A、0.12 B、0.036 C、1.33
- 5) 动态性是指 () 随信号因素水平的改变而改变的特性。
- A、特性值 B、目标值 C、波动大小
- 6) 对于望小特性, SN 比值越大表明质量特性 ()。
- A、越差 B、越好 C、波动越小
- 7) 当误差因素均选 3 水平时, 若采用综合误差因素进行外设计, 此时综合误差因素 N 的水平通常有 ()。
- A、负侧最坏条件 B、正侧是坏条件 C、标准条件 D、正侧最好条件
- 8) 设 Δ_0 表示功能界限, Δ 表示容差, 则对于望小特性有 ()。
- A、 $\Delta = \Delta_0$ B、 $\Delta_0 \leq \Delta$ C、 $\Delta_0 \geq \Delta$ D、 $\Delta_0 \neq \Delta$
- 9) 动态特性的性能好表现在 ()。
- A、特性值波动小 B、目标值能改变 C、对信号因素的反映灵敏 D、特性取值应越大
- 5、已知望小特性 y 的参数设计直积表如下表所示:

列号	1	2	3	4	5	6	7	误差因素 D			
试验号	A	C	A×C	B				D ₁	D ₂	D ₃	D ₄
1	1	1	1	1	1	1	1	1.5	1.7	1.3	1.5
2	1	1	1	2	2	2	2	1.0	1.2	1.0	1.0
3	1	2	2	1	1	2	2	2.5	2.2	1.2	2.0
4	1	2	2	2	2	1	1	2.5	2.5	1.5	2.8
5	2	1	2	1	2	1	2	1.5	1.8	1.7	1.8
6	2	1	2	2	1	2	1	1.0	2.5	1.3	1.5
7	2	2	1	1	2	2	1	1.8	1.5	1.8	2.2
8	2	2	1	2	1	1	2	1.9	2.6	2.3	2.0

试利用 SN 比及其容差分析选取最宜参数水平组合。

- 6、判断题:
- 1) 参数设计的目的是寻找最佳质量因素水平组合。()
- 2) 容差设计的目的是寻找减少目的特性波动的途径。()

[技能练习]

一、训练目的与要求

通过训练, 使学生懂得运用内外表法、综合误差因素法进行望目特性、望大特性、望小特性和动态特性的参数计。熟练掌握容许差设计方法。

二、训练过程与结果

提供练习题, 由学生先独立完成, 然后根据学生做的结果进行讲评。

【测定真值为 20K Ω 电阻的专用电表设计】

系统设计: 系统设计图及计算公式见教材 P154, 所有器件均采用三级品, 电动势不超过 30V, 待测电阻 Y 真值假定为 20K Ω 。A = 100K Ω , C = 10K Ω , D = 100K Ω , E = 2V, F = 50K Ω , B 为可调电阻, 使安培

计 X 的读数为零时，阻值 $B = C Y / D$ 。由于专用电表测量值稳定性差，请你在系统设计的基础上做参数设计和容差设计，具体要求是：

参数设计：以系统设计的参数为初始条件，定为位级 3，可控因素分别以位级 3 的 1 / 4、1 / 2、2、4 倍为位级 1、2、4、5，误差因素取 3 个位级。参数设计要求进行 4 轮以上，每一轮的位级 3（中心条件）都取上一轮的好条件。为了提高效果，进行第二转时，将正交表 $L_{25}(5^6)$ 的列依次作一转换，即原正交表的第 1、2、3、4、5、6 列分别作为第 6、1、2、3、4、5 列，余者类推。

容差设计后，要求做技术经济分析说明。

使用的正交表 $L_{25}(5^6)$ 及 $L_{18}(3^7 \times 2^1)$ 见附录一，附录二。

附录一： $L_{25}(5^6)$

列 行	1	2	3	4	5	6
1	1	1	1	1	1	1
2	1	2	2	2	2	2
3	1	3	3	3	3	3
4	1	4	4	4	4	4
5	1	5	5	5	5	5
6	2	1	2	3	4	5
7	2	2	3	4	5	1
8	2	3	4	5	1	2
9	2	4	5	1	2	3
10	2	5	1	2	3	4
11	3	1	3	5	2	4
12	3	2	4	1	3	5
13	3	3	5	2	4	1
14	3	4	1	3	5	2
15	3	5	2	4	1	3
16	4	1	4	2	5	3
17	4	2	5	3	1	4
18	4	3	1	4	2	5
19	4	4	2	5	3	1
20	4	5	3	1	4	2
21	5	1	5	4	3	2
22	5	2	1	5	4	3
23	5	3	2	1	5	4
24	5	4	3	2	1	5
25	5	5	4	3	2	1

注：任两列的交互列是另外四列。

附录二： $L_{18}(3^7 \times 2^1)$

行号 列号	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	1	3	2	2	1	2	1
2	2	1	1	1	1	2	1	1
3	3	1	2	3	3	3	3	1
4	1	2	2	1	2	3	1	1
5	2	2	3	3	1	1	3	1
6	3	2	1	2	3	2	2	1
7	1	3	1	3	1	3	2	1
8	2	3	2	2	3	1	1	1
9	3	3	3	1	2	2	3	1
10	1	1	1	1	3	1	3	2
11	2	1	2	3	2	2	2	2
12	3	1	3	2	1	3	1	2
13	1	2	3	3	3	2	1	2
14	2	2	1	2	2	3	3	2
15	3	2	2	1	1	1	2	2
16	1	3	2	2	1	2	3	2
17	2	3	3	1	3	3	2	2
18	3	3	1	3	2	1	1	2

第 8 章 设计论证评审分析技术

在适用性质量实现过程中，产品开发设计阶段质量控制最突出的工作是设计论证和评审。通过论证评审，以集思广益的方法来弥补和充实设计自身水平和设计方法的不足，达到优质设计的目的。价值分析技术、可靠性方法和故障分析技术，是达到优质设计目标的重要的设计论证和评审的技术。

8.1 可靠性方法

8.1.1 可靠性及其主要指标与参数

1. 可靠性的概念

在质量管理的发展进程中，愈来愈重视消费者的利益，仅以制造出符合质量规格要求的产品（即所谓合格品）为目的的质量控制已经不适应时代的要求。质量管理应该是充分把握消费者对质量的要求，结合企业的实际生产能力与设计水平，按消费者的要求设计、开发新产品，并在生产过程中将设计的质量转换为产品的实际质量。

可靠性方法近来发展很快，在质量管理以及质量保证中的应用越来越广。如果说传统的质量控制方法其重点是在产品的制造领域内展开，那么可靠性方法的重点是在研究开发、设计、售后服务等“技术”领域的展开。如产品在使用过程中由于零部件等的使用寿命所产生的故障，以及由于设计中的不完善之处所引起的故障等等，可靠性方法是解决这类问题极为有效的工具。

可靠性是指产品在规定的使用期限以及使用条件内，完成其预期功能的能力，它主要包括以下三个内

容：耐久性、可维修性和设计可靠性。

2. 可靠性的主要指标及参数

理想化的 100%可靠的产品是在每一次使用时都能充分发挥其功能的产品。但是，绝大部分工业产品从开始使用到报废期间内，总是会出现这样那样的故障，而妨碍产品发挥其功能。对于可维修的产品，设其能正常工作的时间为 up time，不能正常工作（包括送交修理的时间）为 down time，则产品在使用期间的工作状态如图 8-1 所示。

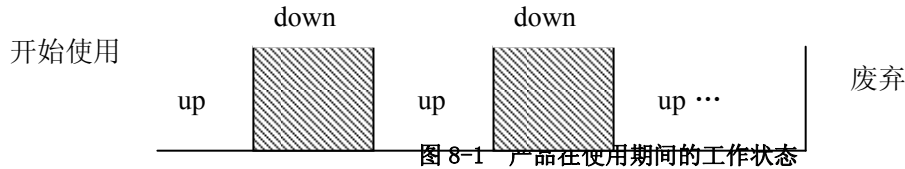


图 8-1 产品在使用期间的工作状态

(1) 有效度

产品的有效度 Availability 是可靠性的重要指标之一。设有效度用 A 表示，则

$$A = \frac{\text{可正常工作时间}}{\text{可正常工作时间} + \text{不可正常工作时间}} = \frac{UP}{UP + Down}$$

(2) 耐久性

耐久性是产品持续处于可正常工作状态的性质，多以产品使用寿命为指标。其中平均故障时间间隔 MTBF (Mean time between failures)，是分析耐久性的重要参数之一。从图 8-1 上看，MTBF 即各次正常工作时间 (up) 的平均值，MTBF 也有用行走公里数、使用次数等等作为单位的情况表示。对于不可维修品，其耐久性一般用平均寿命 MTTF (Mean time to failure) 表示，MTTF 即各个产品可正常工作时间之总和的平均值。

(3) 可维修性

可维修性以平均修复时间 MTTR (Mean time to repair) 为指标的情况最多。从图 8-1 上看，MTTR 即不可正常工作时间 (down) 的平均值。在产品耐久性，特别是 MTBF 较小的情况下，维修的简易性与 MTTR 指标，对那些可简便迅速修复出了故障的产品，在衡量其提高产品的可靠性方面有很大的作用。

综合考虑耐久性与可维修性，有效度 A 亦可用下式表示：

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (8 \cdot 1 \cdot 1)$$

有效度突出强调在需要的时候可正常工作的概率。完好的电视机，随时可能接受电视节目，即便是为开启，它也处于可正常工作的时间内。因此，有效度不同于开动率，开动率即单位时间内产品处于使用状态的时间。开动率对于可靠性分析无实际意义，甚至不能作出开动率与经济效益成正比的结论。

对于那些不可维修的产品或零部件，产品或零部件是否可更换，更换工作难易以及所需时间，习惯上也认为是可维修性所必需探讨的问题。

设计可靠性，其意义除了防止设计上的失误，还应考虑控制不良后果蔓延扩散的措施，以防止局部的故障影响到其他部分甚至全局，如配电线路上的保险装置设计。以及充分考虑人的生理条件，使使用者操作简单、舒适、增加其满足感等等。

设计可靠性必须在设计方案中得到体现，设计审查时也必须专门评价有关的问题，作为设计可靠性方法，近年来故障形式及其后果分析法 FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) 在设计领域里的应用越来越广泛。

除上述三要素外，由于设备的故障或是系统的故障导致对人身以及财产的重大损失也时而会发生，为防止重大事故的发生还有安全性的问题。尽管安全性的问题常常是人为的因素造成的，如驾驶员的过失导致的车祸等。但安全性的保证工作大量涉及到可靠性问题，环境污染也有同样的问题，这些也都是作可靠性分析时所必需加以考虑的。

8.1.2 故障

产品的可靠性不断受到多方面原因的影响，这些原因直接或间接地分别对可靠性三要素产生不良的影响，导致可靠性不足。其中一个主要原因是故障。

所谓故障，就是原材料、零部件、产品以及系统，部分或全部地丧失了其原有的性质、性能，使其预期的功能不能充分地发挥。故障根据其起因，可分为缺陷故障、寿命故障与设计故障。

1. 缺陷故障

缺陷故障是指产品以及系统在交付使用前已经存在着不同程度的缺陷，在使用中表现为故障。如一颗不合格的螺丝钉也会造成整台设备不能正常工作。这类故障的克服应从选用材料、生产过程的管理以及产品检验等方面加以解决。

2. 寿命故障

寿命故障是指产品或系统的全体或某一部分接近或超过其正常使用寿命界限导致故障的发生。这类故障是制造过程质量控制方法所不能克服的。除了提高产品的使用寿命外，应尽可能使产品或系统的各部分使用寿命相同。且注重分析产品达到使用寿命期限的征兆，以防出现恶性后果。对于产品或系统的某一部分是使用寿命特别短的情况，应在维修、更换的容易性和迅速上下功夫，以提高其整体的可靠性。

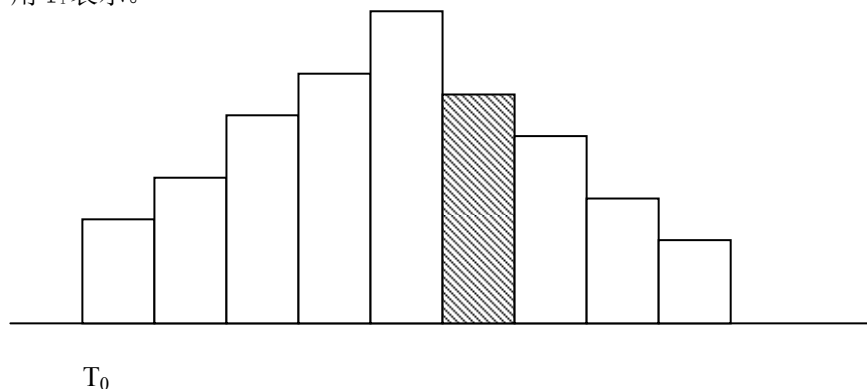
3. 设计故障

设计故障是指在设计过程中未能掌握产品的质量要求以及对使用条件、环境的错误判断，导致产品在使用中出现故障。广泛深入地调查、了解消费者的真实需求以及使用条件、使用环境，是减少设计故障的基本途径。例如，面向边远地区的电视机，必须在设计时充分考虑接受的灵敏度，否则，收看不到电视节目的电视机毫无可靠性可言。尽管这种电视机在其他地区或许是优质产品。

8.1.3 可靠性的统计方法

1. 故障率与寿命分析

产品的寿命值是一项质量特性值，它也存在着波动特性。设取 n 个样本作寿命试验。如以横坐标为试验时间，纵坐标为样本出故障数，试验的结果可作出如图 8-2 所示的有 m 个区间的直方图，即寿命分布图。这里，第 i 区间 (T_{i-1} 至 T_i) 的中心值与区间的幅度分别用 t_i 和 h 表示。该区间的频数为在此时间内出故障的样品数，用 f_i 表示。



在 T_{i-1} 至 T_i 的时间范围内，其平均故障率 $\lambda(T_{i-1}, T_i)$ 的推定值由 (8.1.2) 计算式得到，

$$\hat{\lambda}(T_{i-1}, T_i) = (f_i / \sum_{k=i}^m f_k) / h \quad (8.1.2)$$

即平均故障等于在一定时间范围内出现的故障数 f 除以到 T_{i-1} 时刻为止尚未出现故障的样本残存数。

令 h 趋于 0，寿命分布的直方图即可由概率密度函数 $f(t)$ 取而代之以，见图 8-3。 $f(t)$ 反映了寿命分布的形式。

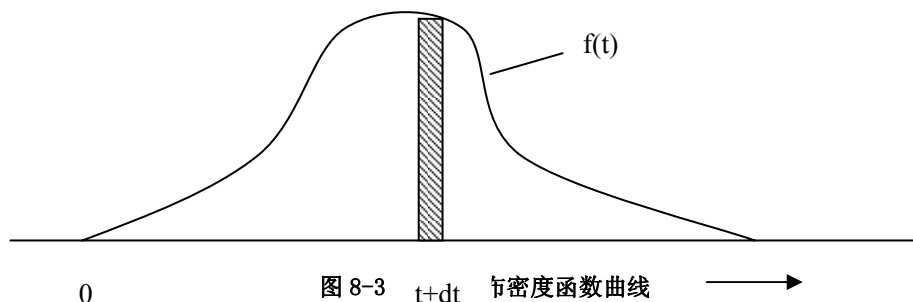


图 8-3 $t+dt$ 的概率密度函数曲线

$$\int_0^{\infty} f(t) dt = 1 \quad (8.1.3)$$

此时， t 时刻的瞬间故障率或简称故障率 $\lambda(t)$ 是时间的函数，(8.1.4) 式成立。

$$\lambda(t) = f(t) / \int_t^{\infty} f(t) dt \quad (8.1.4)$$

$$\text{令: } R(t) = 1 - F(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt \quad (8.1.5)$$

式中 $R(t)$ ：至 t 时刻为止未出故障的概率。

$F(t)$ ：至 t 时刻为止已出故障的概率。

$R(t)$ 与 $F(t)$ 又分别叫做可靠度和不可靠度。

将式 $1 - F(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt$ 两边微分可得

$$d(1 - F(t)) = f(t) dt$$

同式 (8·1·4) 一起代入式 (8·1·3) 可得

$$\lambda(t)dt = d(1 - F(t)) / [1 - F(t)]$$

两边从 0 到 t 积分可得

$$-\int_0^t \lambda(t)dt = \ln[1 - F(t)] \quad \text{由此可得}$$

$$F(t) = 1 - e^{-\int_0^t \lambda(t)dt} \quad (8 \cdot 1 \cdot 6)$$

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t)dt} \quad (8 \cdot 1 \cdot 7)$$

由公式 (8·1·4) 和式 (8·1·6) 可得

$$\int_0^\infty f(t)dt = e^{-\int_0^t \lambda(t)dt}$$

将上式两边微分可得

$$f(t) = \lambda(t)e^{-\int_0^t \lambda(t)dt} \quad \text{公式 (8·1·8)}$$

(8·1·6)、(8·1·7)、(8·1·8) 三式反映了可靠度、不可靠度与寿命分布的概率密度与故障率之间的关系，是寿命分析最基本的计算式。

例 8-1: 某产品的故障率与时间无关为一常数， $\lambda(t) = 3/\text{万小时}$ ，试计算该产品工作至 1000 小时无故障的可靠度和寿命分布的概率密度函数。

由式 (8·1·6) 可知

$$R(1000) = e^{-\int_0^{1000} 0.0003dt} = e^{-0.3} = 0.741$$

由公式 (8·1·7) 可知

$$f(t) = 0.0003e^{-\int_0^{1000} 0.0003dt} = 0.0003e^{-0.0003t}$$

从上述分析可知，求得故障率函数 $\lambda(t)$ 是进行寿命分析的关键。根据经验， $\lambda(t)$ 在大部分情况下呈如图 8-4 所示的曲线，习惯上称为浴盆曲线。

许多产品是系统，尤其是机械产品，人们对这些产品在使用和试验中获得的大量数据，进行统计分析后，发现产品的故障率 λ 和时间 t 的关系如图 8-4 中所示的曲线形式。这条曲线明显的分为三个阶段。在使用初期，故障稍微偏高。经过一段较短时期的使用过程，其故障率迅速下降并基本稳定在一定程度，当使用期间达到一定的时间长度后，故障率又开始随着时间的延长而显著增加直至停止使用。三个期间的故障分别称为初期故障，偶发故障和耗损故障。使产品的故障率达到构法故障期的故障率水平的时间称为交付使用点，故障率达到耗损故障期故障率水平的时间为更新点，这两点的水平对衡量产品可靠性有重要意义。

求得 $\lambda(t)$ 的准确表达式是非常困难的事情，甚至是不可能的。根据 $\lambda(t)$ 呈浴盆曲线的特点，有近似的表达式如下：

$$\lambda(t) = \frac{m}{t_0} t^{m-1} \quad (8 \cdot 1 \cdot 9)$$

当 $0 < m < 1$ 时， $\lambda(t)$ 为单调减少函数

$m=1$ 时， $\lambda(t)$ 为一常数

$m > 1$ 时， $\lambda(t)$ 为单调增加函数

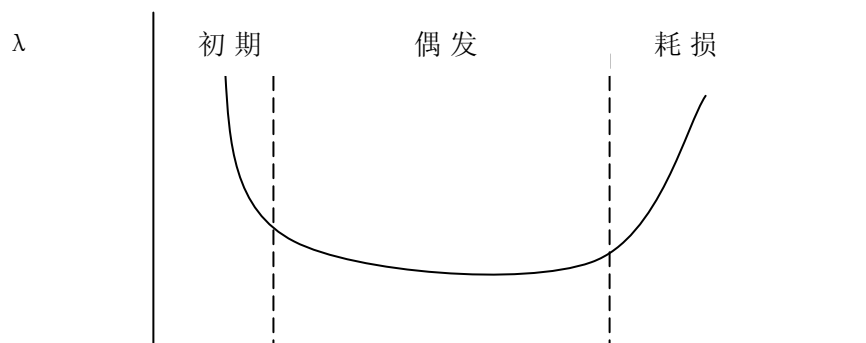


图 8 更新

将公式 (8·1·8) 代入式 (8·1·7) 可得

$$f(t) = \frac{m}{t_0} t^{m-1} e^{-t_m/t_0} \quad (8 \cdot 1 \cdot 10)$$

上式是呈威布尔 (Weibull) 分布的概率密度函数。

从图 8-5 可以看出, 威布尔分布曲线 ($f(t)$) 的形状随 m 的值变化而变化, 故称 m 为形状参数。从式 (8·1·10) 可知: t_0 的变化会引起 $f(t)$ 值的变化, 故称 t_0 为质量参数。

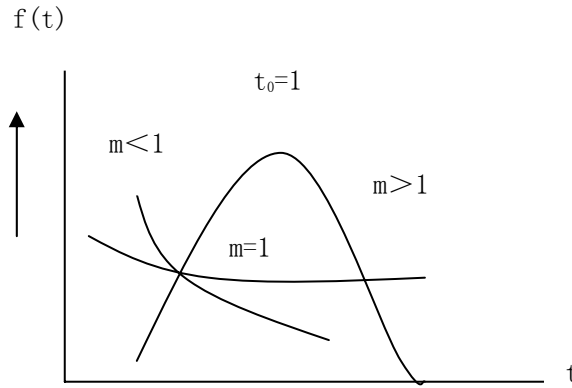


图 8-5 威布尔分布曲线

对于可维修的产品或系统, 一般进入损耗故障期, 即认为是产品寿命的终结。初期故障期持续时间较短, 若不加考虑, 则可视故障率为一常熟, 即取 $m=1$, 这时有

$$\lambda(t) = 1/t_0 = \lambda \quad (8 \cdot 1 \cdot 11)$$

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (8 \cdot 1 \cdot 12)$$

式 (8·1·12) 是呈指数分布的概率密度函数。指数分布是威布尔分布的一种特例。

8.1.4 可靠性指标的推定计算

可靠性指标的推定, 未加说明, 均以指数分布为前提。

1. λ 为 MTBF 的点推定

故障率 λ 为一常数与平均故障间隔时间 MTBF 之间有互为倒数的关系, 即

$$\theta = \frac{1}{\lambda} = MTBF \quad (8 \cdot 1 \cdot 13)$$

设取 n 个样本进行寿命试验, 试验的方式有三种不同的类型。

(1) 完全试验方式

试验一直进行到所有样本均出现故障是停止, 记录下各样本的试验时间 $t_1, t_1 \cdots t_n$ 。MTBF 推定值的计算公式为

$$\hat{MTBF} = \frac{t_1 + t_2 + \cdots + t_n}{n} \quad (8 \cdot 1 \cdot 14)$$

(2) 定时中止方式

试验进行到预定的时刻 T 即停止, 设有 r 个样本出故障, 其试验时间分别为 $t_1, t_1 \cdots t_r$ 。MTBF 推定值的计算公式为

$$\hat{MTBF} = \frac{t_1 + t_2 + \cdots + t_r + (n-r)T}{r} \quad (8 \cdot 1 \cdot 15)$$

(3) 定数中止方式

试验前, 预先规定当出现故障的样本数达到 r 个时, 即停止试验。因此, 有试验数据 $t_1, t_1 \cdots t_r$ 。MTBF 推定值的计算公式为

$$\hat{MTBF} = \frac{t_1 + t_2 + \cdots + t_r + (n-r)t_r}{r} \quad (8 \cdot 1 \cdot 16)$$

综合以上三式, MTBF 推定值公式可统一写作

$$\hat{MTBF} = \frac{n \text{ 个样本试验时间总和 } T}{\text{试验中出故障的样本数 } r} \quad (8 \cdot 1 \cdot 17)$$

由式 (8·1·12) 可得 λ 的推定值

$$\hat{\lambda} = 1/\hat{MTBF} = r/T \quad (8 \cdot 1 \cdot 18)$$

例 8-2: 已知某系统的故障时间间隔如下:

1670, 50, 3400, 790, 630, 2300。(单位: 小时)

试求 MTBF 与 λ 的推定值。

同一系统的各次故障之间的正常工作时间类似于多个相同系统的完全试验方式, 按公式 (8·1·14) 可得

$$\hat{MTBF} = \frac{1670 + 50 + 3400 + 790 + 630 + 2300}{6} = \frac{8840}{6} = 1473 \quad (\text{小时})$$

$$\hat{\lambda} = 6/8840 = 6.79 \times 10^{-4} / \text{小时}$$

例 8-3: 取 10 部汽车进行可靠性试验, 试验时持续运行 90 千公里时为止。有试验数据如下:

(单位: 千公里)

汽车编号	1	2	3	4	5	6-10
无故障运行路程	14	27	45	61	78	90

试求 MTBF。

MTBF 虽为时间单位量, 但改用其它单位并不妨碍其作为可靠性指标的含义。由公式 (8·1·15) 得

$$\hat{MTBF} = \frac{14 + 27 + 45 + 61 + 78 + (10 - 5) \times 90}{6} = \frac{675}{6} = 135 \quad (\text{千公里})$$

2. λ 与 MTBF 的区间确定

所谓区间推定, 即求出 MTBF 与 λ 的波动范围。不同类型的试验方式其区间推定的计算式是不同的。设显著性水平为 α , MTBF 的区间推定式见表 8-1。

表 8-1 MTBF 的可靠区间 (两侧)

样本试验方式	区间下限 \hat{MTBF}_L	区间上限 \hat{MTBF}_U
完全方式	$2T/x^2(2n, \alpha/2)$	$2T/x^2(2n, 1-\alpha/2)$
定时方式	$2T/x^2[2(r+1), \alpha/2]$	$2T/x^2[2(r+1), 1-\alpha/2]$
定数方式	$2T/x^2(2r, \alpha/2)$	$2T/x^2(2r, 1-\alpha/2)$

上表中的 T 即 n 个样本试验时间的总和。 x^2 是一种分布形式的记号。括号中逗号前的符号是自由度, 逗号后的符号是显著性水平。由于是双侧问题, 取 $\alpha/2$ ($1-\alpha/2$)。若仅讨论单侧界限, 则 $\alpha/2$ ($1-\alpha/2$) 改作 α ($1-\alpha$)。可由 x^2 分布表查出其值。

λ 的可靠区间下 (上) 限, 只需求得相应的试验方式中 \hat{MTBF} 的上 (下) 限的倒数即可。

例 8-4: 设已知 $T=8840$ (小时), $n=6$, $\alpha=0.05$, 试求 MTBF 与 λ 的推定区间

$$\hat{MTBF}_L = \frac{2 \times 8840}{\chi^2(2 \times 6, 0.05/2)} = \frac{17680}{23.34} = 757.5 \quad (\text{小时})$$

$$\hat{MTBF}_U = \frac{2 \times 8840}{\chi^2(2 \times 6, 1-0.05/2)} = \frac{17680}{4.404} = 4104.5 \quad (\text{小时})$$

$$\hat{\lambda}_L = 1/4104.5 = 2.49 \times 10^{-4} / \text{小时}; \quad \hat{\lambda}_U = 1/757.5 = 13.20 \times 10^{-4} / \text{小时}$$

例 8-5: 寿命试验按定时中止方式进行, 已知 $T=675$ (千公里), $r=5$, $\alpha=0.05$ 。求单侧可靠下限的推定值 \hat{MTBF}_L 。

$$\hat{MTBF}_L = \frac{2 \times 675}{\chi^2[2 \times (5+1), 0.05]} = \frac{1350}{21.03} = 64.2 \quad (\text{千公里})$$

本例即前述汽车可靠性一例的继续, 一般要求汽车在行使 5 万公里才进行较大修理, 通过计算, 可知这种汽车有 95% 的把握判定平均行使距离达到 64.2 千公里才须作较大的修理, 从这一点上看是符合技术要求的。

3. 可靠度的推定计算

设产品或系统的预定使用期限或称使命时间 (Mission time) 为 τ 。由式 (8·1·13) 可知:

$$R(\tau) = e^{-\int_0^\tau \lambda(t) dt} = e^{-\lambda \tau} = e^{-\tau / MTBF}$$

因此, $R(\tau)$ 的点推定值以及区间推定值均可简单的求得:

$$\left. \begin{aligned} R(\tau) &= e^{-\hat{\lambda}\tau} = e^{-\tau/\hat{MTBF}} \\ R(\tau)_L &= e^{-\hat{\lambda}_L\tau} = e^{-\tau/\hat{MTBF}_L} \\ R(\tau)_U &= e^{-\hat{\lambda}_U\tau} = e^{-\tau/\hat{MTBF}_U} \end{aligned} \right\} \quad (8 \cdot 1 \cdot 19)$$

例 8-6: 仍以前述汽车寿命试验为例, 设 $\alpha = 0.05$ 。试求行使 50 千公里不出故障的概率 (可靠度)。已知 \hat{MTBF} 为 135 (千公里)。

解: $\tau = 50$ (千公里)

$$R(50) = e^{-50/0.05} = 0.69$$

从计算结果可知, 尽管最低平均无故障行使距离可超过技术要求, 但在行使 50 千公里不需维修的概率尚不足 70%。

8.1.5 威布尔分布的参数推定

以上是在指数分布情况下的计算, 如果 $m \neq 1$, 而以威布尔分布为基础做可靠性的分析时, 就有必要推测威布尔分布的两项参数 m 与 t_0 。以下这两项参数的简易推定法。

1. 形状参数 m 的推定

设有寿命试验数据 t_1, t_1, \dots, t_n 。其平均值与方差分别用 \bar{t} 与 V 表示

$$\text{令: } cv = \sqrt{V} / \bar{t} \quad (8 \cdot 1 \cdot 20)$$

$$v = \frac{\sum (t_i - \bar{t})^2}{n-1} \quad \bar{t} = \frac{1}{n} \sum t_i$$

式中

CV 为变动系数, 求得 CV 后即可查表 8-2, 求出 m 的推定值。

表 8-2 m 推定表

CV	2.0	1.5	1.0	0.75	0.50	0.45	0.35	0.25
m	0.55	0.71	1.00	1.35	2.10	2.35	3.11	4.55

2. 度量参数 t_0 的推定

在已知形状参数 m 的情况下, t_0 的推定值可按以下各式计算

(1) 完全试验方式

$$\hat{t}_0 = \frac{t_1^m + t_2^m + \dots + t_n^m}{n} \quad (8 \cdot 1 \cdot 21)$$

(2) 定时中止方式

$$\hat{t}_0 = \frac{t_1^m + t_2^m + \dots + t_r^m + (n-r)T^m}{r} \quad (8 \cdot 1 \cdot 22)$$

(3) 定数中止方式

$$\hat{t}_0 = \frac{t_1^m + t_2^m + \dots + t_r^m + (n-r)t_r^m}{r} \quad (8 \cdot 1 \cdot 23)$$

t_0 的区间推定, 只需将标 8-1 中的 $2T$ 改写作相应的 $2n \hat{t}_0$ 或 $2r \hat{t}_0$ 即可求得其区间的上下界限 \hat{t}_{0U} 与 \hat{t}_{0L} 。

8.1.6 系统可靠度的计算

系统可根据组成系统的各分系统的结合方式分为串联、并联、串并联三类。如图 8-6 所示。串联记号用 “ \cap ”, 即逻辑乘; 并联记号用 “ \cup ”, 即逻辑加。

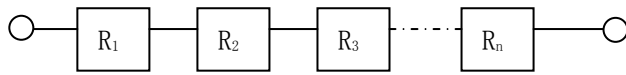
设各分系统的可靠度分别为 R_i ($i=1, 2, \dots, n$)。串联系统的可靠度 R 可按下式计算

$$R = \prod_{i=1}^n R_i \quad (8 \cdot 1 \cdot 24)$$

并联系统的可靠度 R 可按下式计算

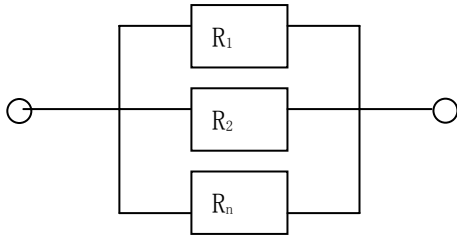
$$R = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i) \quad (8 \cdot 1 \cdot 25)$$

上述两式中的 \prod 是连乘积的记号。



$$R = \prod_{i=1}^n R_i$$

(a) 串联系统



$$R = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i)$$

(b) 并联系统

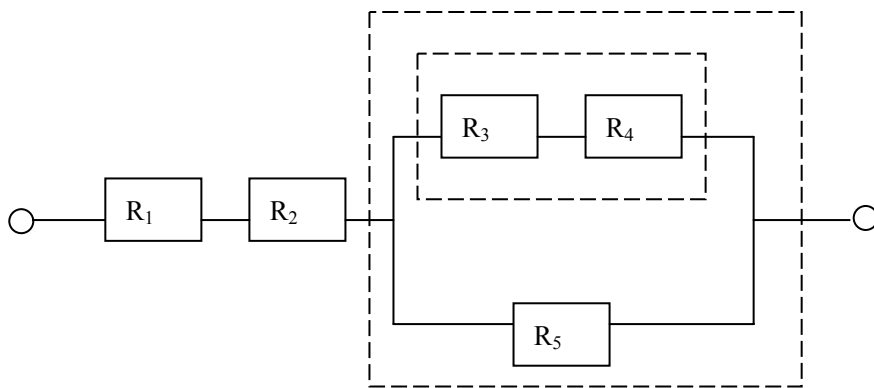


图 8-6 系统的类型

例 8-7: 设有 3 个分系统，可靠度 R_i 分别为 0.9、0.85、0.8。试分别求出由三者串连的系统和由三者并联的系统的可靠度。

解：

1. 串联系统可按式 (8-24) 求得

$$R = \prod_{i=1}^n R_i = 0.9 \times 0.85 \times 0.8 = 0.612$$

2. 并联系统可由式 (8-25) 求得

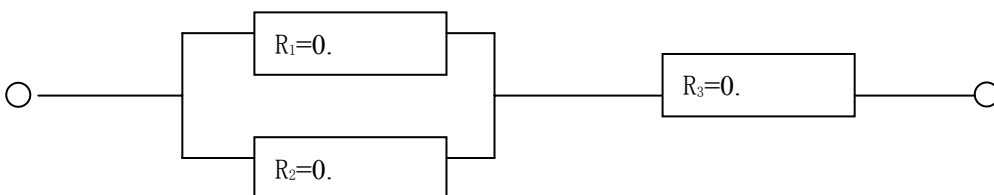
$$R = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i) = 1 - (1 - 0.9)(1 - 0.85)(1 - 0.8) = 0.997$$

串联系统的物理意义是只要有一个分系统出现故障，则系统即不能正常工作。因此，系统可靠度一般低于各分系统的可靠度。并联系统的物理意义是只要有一个分系统还能正常工作，则系统仍能正常工作，因此，系统可靠度一般高于各分系统的可靠度。

但是，我们所遇到的大部分系统是串、并联的混合系统，系统的可靠度无统一计算公式。一般可先利用结合记号写作系统的结合方式，再根据式 8-24 和 8-25 这两个基本公式去计算系统可靠度。如图 8-6.c 所示的系统，其结合方式可协作 $R_1 \cap R_2 \cap [(R_3 \cap R_4) \cup R_5]$ 。其可靠度为

$$R = R_1 \cdot R_2 \cdot [(1 - (1 - R_3 \cdot R_4)) \cdot (1 - R_5)]$$

例 8-8: 试计算下图所示系统的可靠度



解：如上图所示的结合方式为 $(R_1 \cup R_2) \cap R_3$ ，其系统可靠度为

$$R = [1 - (1 - R_1)(1 - R_2)] \times R_3 = [1 - (1 - 0.99)(1 - 0.85)] \times 0.80 = 0.788$$

在实际应用中有一种广为采用的 $r-n; G$ 系统。所谓 $r-n; G$ 系统是指由 n 个分系统组成的系统，在即

使有 r 个分系统出现故障情况下, 系统仍可正常工作的系统, $r-n; G$ 系统对于提高可靠性以及安全性有很大的作用。并联系统实际上是 $r-n; G$ 系统的特例, 即 $r=n-1$ 的 $r-n; G$ 系统。这一类型的系统也有协作 $r-n; F$ 系统即当有 r 个分系统出现故障时, 系统将不能正常工作。 $r-n; F$ 系统与 $r-n; G$ 系统之间有下列关系。

$$(r-1)-n; F=r-n; G \quad (8 \cdot 1 \cdot 26)$$

$r-n; G$ 系统是所谓超长系统的一种, 其可靠度 R_s 按下式计算, 这里设各分系统的可靠度均相同且等于 R 。

$$R_s = \sum_{i=0}^r \binom{n}{i} (1-R)^i R^{n-i} \quad (8 \cdot 1 \cdot 27)$$

为便于计算, 有时改写作

$$R_s = 1 - \sum_{i=r+1}^n \binom{n}{i} R^i (1-R)^{n-i} \quad (8 \cdot 1 \cdot 28)$$

例 8-9: 装有 4 台发动机的飞机, 只要有 2 台处于正常工作状态, 仍可安全飞行, 设每台发动机的可靠度 $R=0.9$, 试求发动机系统的可靠度。

解: 利用式 (8-28)

$$\begin{aligned} R_s &= 1 - \left[\binom{4}{3} \times 0.9^3 \times (1-0.9) + \binom{4}{4} \times 0.9^4 \times (1-0.9)^4 \right] \\ &= 1 - (4 \times 0.9 \times 0.001 + 1 \times 1 \times 0.0001) = 0.9963 \end{aligned}$$

8.2 故障分析方法

在设计对象是一个复杂的系统时, 产品设计评审的内容用直观的方法已难以判断和评审设计质量, 特别是对系统单元可能发生故障, 其故障的影响和危险性分析等必须采用一套科学方法才能保证产品的设计质量符合用户的适用性要求。故障模拟、影响及危险性分析法 (FMECA) 和故障树分析 (FTA) 法是两种在可靠性分析方法基础上发展起来的产品设计评审法, 在此统称故障分析法。

8.2.1 FMECA 法

为寻找设计得不完善之处及潜在的缺陷, 以便作出关于设计评审和修改决定, 从而预防发生产品失效和把某些失效消灭在试验和使用之前, 可以应用故障模拟、影响及危险性分析法 (FMECA 法)。

从定性的角度把握系统弱点是 FMECA 的主要办法。通过分析其对象在完成任务时可能产生哪些故障, 并根据故障所造成的后果严重性加以分级, 对致命的或严重的故障, 提出设计变更方案。

应用 FMECA 法, 要合理分解分析对象的层次。若分析对象是一个产品系统, 可按系统——分系统——总成——部件——零件分解, 或按系统——分系统——装置——单位操作进行分解。分析对象的分解, 必须有坚实的专业技术知识。在合理分解的基础上, 才有可能逐一分析个基本构成要素的故障形式及其影响, 进行失效模式分析, 决定采取何种措施改正。

分析某个元器件是否存在特殊问题, 通常从下述六个方面入手:

- (1) 绘制系统结构图, 弄清系统和元器件的功能;
- (2) 列出有可能失效的元器件;
- (3) 确定故障的重要程度。如果元器件失效导致系统发生故障, 该元器件的失效称为致命失效;
- (4) 研究分析某些元器件的失效对整个系统功能的影响;
- (5) 了解故障发生的相对频数;
- (6) 了解是否可以使用代用 (贮备或替换) 元器件。

进行元器件的失效模式分析, 除了要系统的工作外, 还要考虑因设备故障或人为失误对人的安全造成的问题, 即进行安全分析。

综合分析, FMECA 分析的具体解析步骤可归纳如下:

1. 确定解析对象及其任务

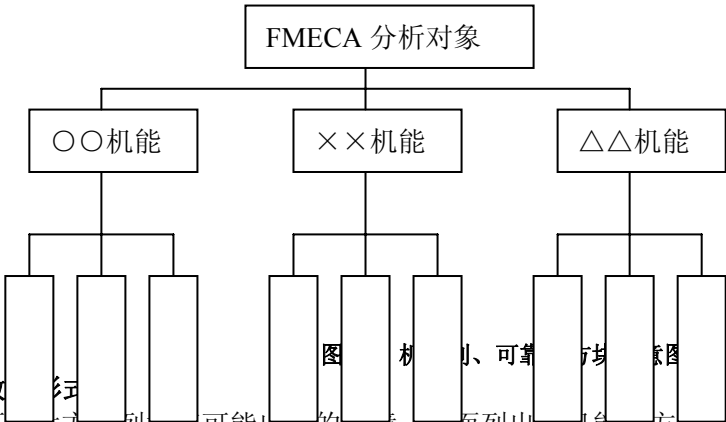
解析对象必须是可以分解为若干层次, 其工作任务必须明确。即被解析的对象在工作时完成哪些任务及其质量水平、哪些功能。任务不明确则无可靠性可言。一般讲, 解析对象可以是系统, 也可以是分系统或总成、装置。

2. 决定分解层次

一般只将解析对象分解至以下两个层次的水平。即系统分解到总称, 总成分解到零部件。分解的第一层次即第一次分解, 决定机能别方块, 分解为若干部分。为了分解工作的方便, 原则上分为 5-6 块机能别

方块为宜。第二层次即第二次分解，把机能别方块逐块分解为可靠性方块。可靠性方块也是 FMECA 解析的基本构成要素。少数不便再分解的机能别方块可不作分解。各机能别方块具体分解为多少块可靠性方块并无一定要求，一般以不超过 6 块为宜。

综合一次与二次分解的结果，需做出机能别、可靠性方块图，如图 8-7 示。



3. 列举故障

先就各可靠性方块列举其可能出现的故障，进而列出各机能别方块可能出现的故障。列举故障应参考以往同类产品的质量情报，消费者的使用意见，以及质量表累积的故障频次。

4. 估算故障率和选定主要故障

其目的是针对那些出现频率高的或造成损失严重的主要故障形式寻求改善方法。一般是通过故障评级选定主要故障，评级的具体办法由两种，但都只是大略的评估方法：

(1) 故障评分法。设有 5 种故障评分要素，如表 8-3 所示。设各要素的评分系数为 C_i ，故障评分得分为 C_S ，则：

$$C_S = (C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot C_4 \cdot C_5)^{1/5} \tag{8 \cdot 2 \cdot 1}$$

表 8-3 故障评分要素

i	评分要素
1	对机能别方块以及任务的影响程度
2	不良影响所涉及的范围大小
3	发生故障的频率
4	防止发生故障的难易程度
5	设计内容的更新程度

(2) 致命度评分法。同样设 5 种评分要素，见表 8-4。设各要素的评分系数为 F_i ，致命度评分为 C_E ，即

$$C_E = F_1 \cdot F_2 \cdot F_3 \cdot F_4 \cdot F_5 \tag{8 \cdot 2 \cdot 2}$$

根据 C_S (C_E) 的值，即可大致定出故障的等级（表 8-5）。

表 8-4 致命度评分要素与系数

评分要素	内容	系数
故障影响的大小 F_1	造成人身安全事故或任务无法完成	5.0
	造成相当大的损失	3.0
	对任务有影响	1.0
	对任务无甚影响	0.5
故障影响所涉及的范围 F_2	对系统有 2 处以上重大影响	2.0
	对系统有 1 处重大影响	1.0
	对系统影响不大	0.5
故障发生频率 F_3	发生频率相当高	1.5
	有发生的可能性	1.0

	发生可能性极小	0.7
故障预防措施的难易 F ₄	无法预防	1.3
	可能预防，但措施复杂	1.0
	完全可以预防，且措施简单	0.7
设计更新程度 F ₅	设计变化很大	1.2
	设计与以往类似	1.0
	重复以往设计	0.8

表 8-5 C_s (C_E) 与故障等级的关系

C _s (C _E)	故障等级	评定基准	相应的措施
7-10	I 致命	危及人命，任务无法完成	必须重新设计
4-7	II 重大	任务的主要部分无法完成	必须修改原设计
2-4	III 轻微	任务的一小部分无法完成	稍加修改原设计
2 以下	IV 极微小	基本无影响	无需更改原设计

5. 列举各主要故障的发生原因

列举各主要故障的发生原因，可采用因果分析图等方法，在列举出的诸原因中应找出主要原因，并分析探讨解决的方法。

以上步骤也可用产品分等的办法确定故障优先级。如移动式草坪洒水器故障分析（见表 8-6），对故障类型出现的概率和影响的严重程度分 1~5 级。1 级：很低（<1/1000），2 级：低（~3/1000），3 级：中（~5/1000），4 级：高（~7/1000），5 级：高（~9/1000）。分析结果表明预期故障出在轴承架和推进器上。

表 8-6 移动式草坪洒水器 FMECA

可靠性方块	可能的故障	原因	概 率 (%)	影响严重 程度	对产品的影响	措施
蜗杆轴承 4224	轴承磨损	没有对准底架	1	4	喷头摆动或速度放慢	改进检验
		喷头摆动过大	1	3	同上	改进蜗杆轴承
轴承架 4225	过度磨损	质劣材料构成	5	4	喷头摆动或断电	改变架的材料
铜轴承		轴承面有脏水	5	4	同上	改进蜗的密封面
推进器 4226	过度磨损	水压过高	2	5	喷头将停止不动	在说明书中向用户说明
		推进器中有脏水	5	5	同上	改进蜗杆密封设计

6. 作 FMECA 用表。

将上述各步骤的内容逐一记入 FMECA 用表（表 8-7）中，该表即可作解析之用，也可以做归纳总结之用。

表 8-7FMECA 用表 NO:

系统: _____ 日期: _____
分系统: _____ 制表: _____
组装品: _____ 审核: _____

构成要素项目				机 能	故 障 形 成 与 推 定原因	在 系 统 中作用	故障及影响			故障检测 方法	维 修 更 新 所 需 时间	故 障 等级	改 进 方 案
名称	识 别 代号	图 纸 编号	系统方块 图代号				组装品	分系统	系统(任 务)				

(a)

7. 提交原设计可靠性的综合报告。

经上述评析、整理后必须对原设计方案的可靠性提出分析结论，指出设计的不完善之处以及潜在的故障形式及其后果，并提出需作设计修改、变更部分的具体改革措施。

表 8-7 FMECA 用表

NO:

系统: _____					日期: _____	
分系统: _____					制表: _____	
组装机: _____					审核: _____	
方块图	零部件名称	故障形式	推定原因	对组装机影响	对分系统影响	故障等级

(b)

上述 7 个步骤是 FMECA 解析必需的工作。对于大型的产品或系统，一次 FMECA 分析不可能分析到每一个零部件所可能发生的故障形式，还有必要对其总成或组装机继续作 FMECA 分析，有的对象还需进行多次 FMECA 分析。

8.2.2 FTA 法

FTA 法，又称故障树分析法，或失效树分析法。是一种对复杂系统进行可靠性、安全性分析的预测方法。它从可靠性和安全性的角度出发，分析不希望发生（或出现）的系统的事件，并采用逻辑图描绘不希望发生的事件的原因，和估计不希望发生（或出现）的事件，为追寻原因从上到下逐步扩大分析的方法，是故障逻辑的一种图式分析法。利用 FT 图，将系统中的潜在缺陷、故障及灾害等发生构造模型化，通过解析模型，找出改进的方法。因而，这个方法在设计阶段可以帮助人们寻找潜在的事故，在系统的实用阶段可以帮助人们进行失效诊断。失效树分析与计算机的结合，更是提供了分析复杂系统可靠性的有力工具。60 年代初，失效树分析首先应用于宇航工业，后来扩展到核工业，目前已日益进入到一般电子、机械、化工、交通、土建等领域。

1. 失效树的构造及代数表达式

构造失效树是 FTA 法最关键的一步。所谓构造失效树，就是找出系统失效和导致系统失效的诸因素之间的逻辑关系，并将这种关系特定的图形 FT 图（失效树）表示。所以 FT 图是由各种事件以及联结事件的逻辑门构成的。

进行系统的可靠性分析时，必须首先明确什么状态是正常，什么状态是失效。系统失效的状态往往不止一个，一定要选择一个最主要的系统失效的状态加以分析，构造相应的 FT 图（失效树），对于其余的失效状态，如果需要也可以构造相应的 FT 图。在 FTA 中，把需要分析的系统失效事件成为首位事件，记做 T 事件。它必须具备三个条件：

- (1) 定义明确，且有可能检测；
- (2) 可以进行分解；
- (3) 有预防和改善的可能。

首位事件确定后，作为 FT 图的根，先画在最上面，然后在下一排画出引起 T 事件发生的直接原因，可以包括设备失效和人为失效，这种原因称为失效事件或二次事件。T 事件及二次事件之间，根据它们的逻辑关系，画上适当的逻辑门，把首位事件 T 和二次事件联结起来。接着再把造成第二排各种二次事件的直接原因画在第三排，这些原因同样称为失效事件或二次事件，两排失效事件之间也用适当的逻辑门联结起来。如此顺藤摸瓜进行下去，一致追溯到那些原始的，或失效规律已掌握的原因为止，这些最基本的原因称为基本事件，它们是不能再分解，或不必再分解的失效事件。

FT 图（失效树）实际上是一个以首位事件为根，具有若干个枝，干枝上又有分枝的类似于一颗倒挂着的树的图形，失效树的名称也由此而来。对于大型复杂系统，要画 FT 图，工作量是相当大的，有时还难免会遗漏一些造成 T 事件出现的原因。目前已可利用电子计算机协助人们建立 FT 图。有时为了简化 FT 图，可将 FT 图中的独立部分，成为模块，用一个准基本事件代替，准基本事件有时也表示一个原因不明或故意没有讨论下去的失效事件。

对于不同的首位事件 T，既有一个 FT 图与之对应。但由于分析者的经验水平所限，各人所作的 FT 图是不尽相同，甚至差异很大。因此，进行 FTA 解析，与作 FMECA 解析一样，都必须召集有关人员，靠集体的智慧来分析。

FT 图的绘制需利用事件的记号和逻辑记号，常用的一些基本记号及其含义见表 2-19。在绘制 FT 图时，T 事件用方框表示，基本事件用圆圈表示，中间失效事件的方框有时也可以省略，只在逻辑门旁边注以英文字母，以表示此事件。

逻辑门包括或门、与门、非门、异或门。

设 X_1 、 X_2 表示两个不同的事件，若

(1) 两个事件中至少一个事件发生，便能导致另一个事件 X_3 发生，这种关系称为逻辑“或”关系，相应的代数表示式为：

$$X_3 = X_1 + X_2 \quad (8 \cdot 2 \cdot 3)$$

其逻辑图形称为逻辑或门。符号见表 8-8 中的序号 7 图示。

(2) 两个事件必须同时发生时, 才能导致 X_3 发生, 则称这种关系为逻辑“与”关系, 相应的代数表示式为:

$$X_3 = X_1 \cdot X_2 \quad (8 \cdot 2 \cdot 4)$$

其逻辑图称为逻辑与门, 符号见表 8-8 中序号 6 图示。

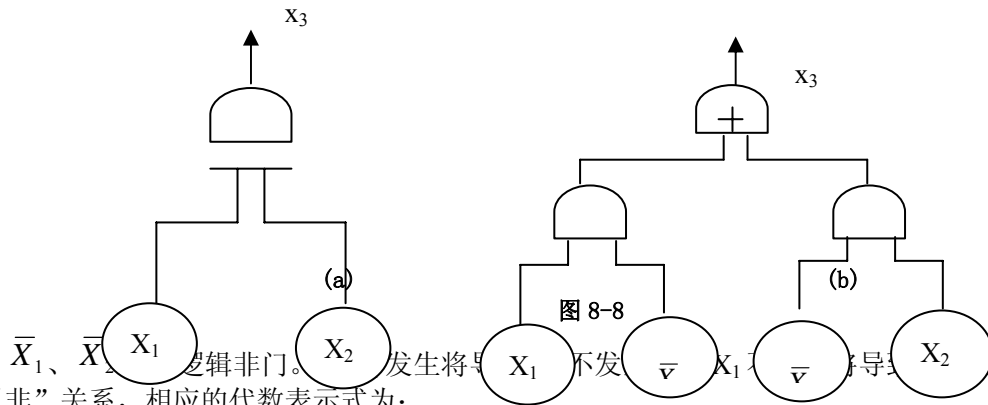
表 8-8 FT 图常用的基本记号

序号	名称	记号	说明
1	事件		首位事件以及由基本事件组合而成的事件 (中间事件)
2	基本事件		无法再展开的基本事件, 以及发生概率可单独的获得, 不便于再展开的最低层次事件
3	非展开事件		情报不足以及技术要点不明、不具备展开条件的事件, 具备展开条件时应展开
4	通常事件		被认为经常发生的事件, 如火灾时“空气的存在”即通常事件
5	移行记号		图上往关连部分的移行或连结, 三角形顶上的线表示往此处移行
			同上, 三角形边上的线表示此处向外移行
6	AND 门		所有的输入事件共存时, 输出事件才发生, 逻辑乘
7	OR 门		输入事件只要一个存在, 输出事件就发生, 逻辑加
8	INHIBIT 门 (制约门)		输入事件满足所示条件时, 输出事件才发生, 条件有时用发生概率表示

(3) 两个事件中任一发生都将导致 X_3 发生, 但它们两个同时发生时 X_3 却不发生, 则这种关系称为逻辑“异或”关系, 相应的代数表示式为

$$X_3 = X_1 \bar{X}_2 + \bar{X}_1 X_2 \quad (8 \cdot 2 \cdot 5)$$

其逻辑图称为逻辑异或门, 如图 8-8 (a) 示, 其等效图是图 8-8 (b)。



\bar{X}_1 、 \bar{X}_2 逻辑非门。发生将导致 X_3 不发生。称这种关系为逻辑“非”关系, 相应的代数表示式为:

$$X_2 = \bar{X}_1 \quad (8 \cdot 2 \cdot 6)$$

如果 X_1 表示事件发生, 则 \bar{X}_1 表示事件不发生。其逻辑图称逻辑非门, 符号见图 8-9 示。

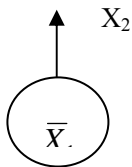


图 8-9 逻辑非门

例 8-10 图 8-10 是一个给灯泡供电的电路图，假设导线不会失效，选“灯不亮”为首位事件，则图 2-9 时相应的 FT 图。图中个字母的含义如下：

TOP：灯泡不亮。A：灯泡失效。B：电源 B 失效。C：继电器接点不能闭合。D：回路断路器接点不能闭合。E：开关不能闭合。F：开关不能打开。G：电源 G 失效。H：继电器线圈开路。I：回路断路器线圈开路。

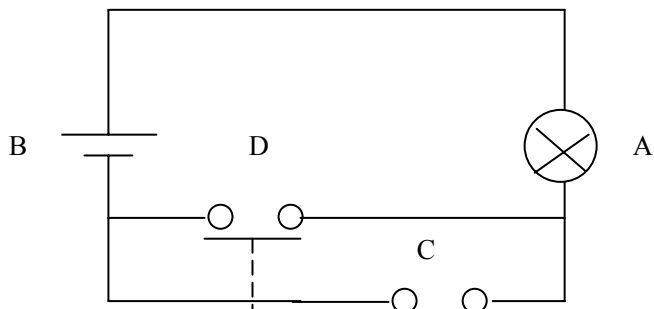


图 8-10 灯泡供电电路图

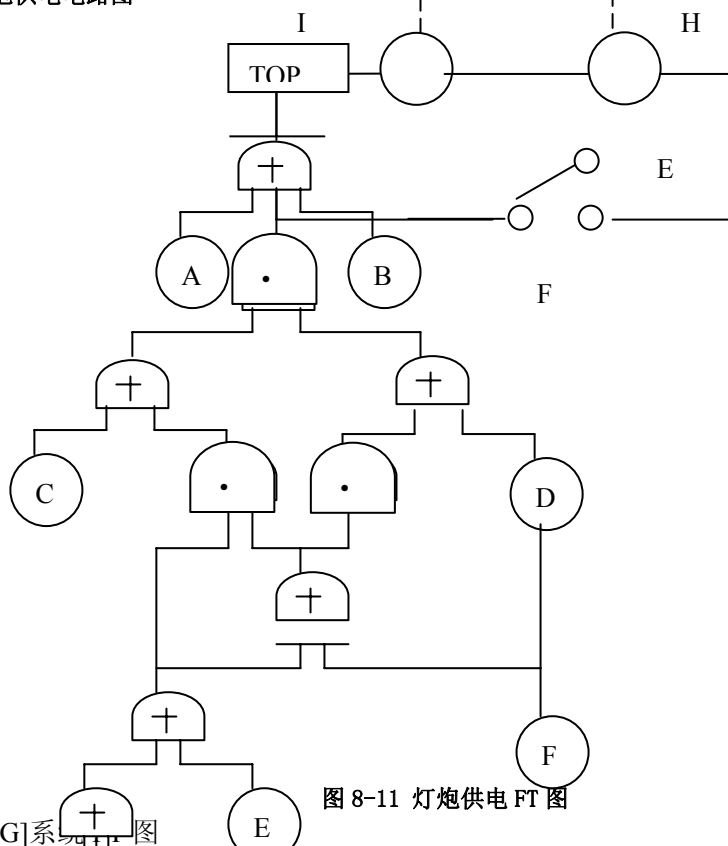


图 8-11 灯泡供电 FT 图

例 8-11 2/3[G]系统 FT 图

如以 X_1 、 X_2 、 X_3 表示三个单元 A_1 、 A_2 、 A_3 失效事件，则三个单元中取 2 好系统地 FT 图如图 8-12 所示。其结构函数为

$$\phi(x) = x_1 x_2 + x_1 x_3 + x_2 x_3$$

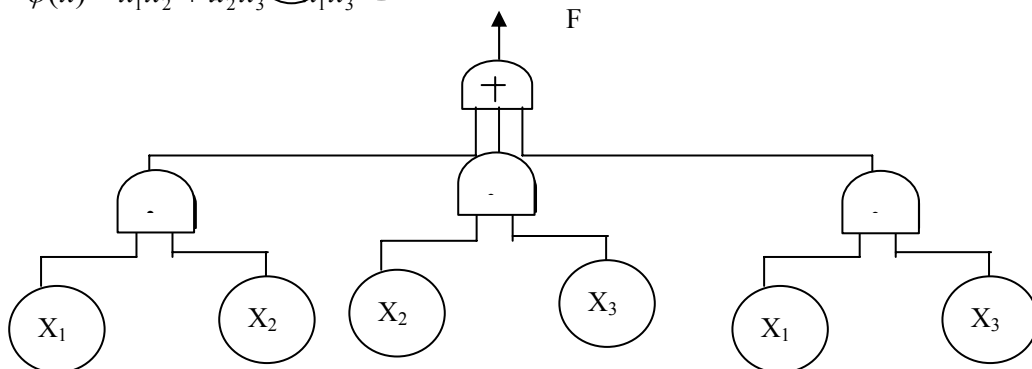


图 8-12 2/3[G]FT 图

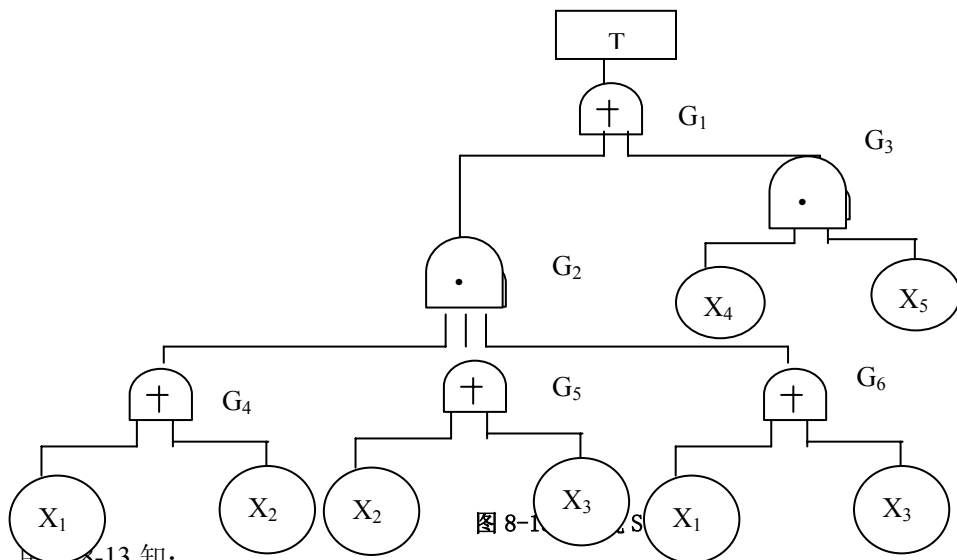
2. FT 图的简化

整理简化 FT 图，需要应用逻辑代数的指示，其最简单的运算见表 8-9.

表 8-9 逻辑代数的基本运算法则

	逻辑加	逻辑乘
恒等律	$A+A=A$	$A \cdot A=A$
交换律	$A+B=B+A$	$A \cdot B=B \cdot A$
结合律	$A+(B+C)=(A+B)+C$	$A \cdot (B \cdot C)=(A \cdot B) \cdot C$
吸收律	$A+(A \cdot B)=A$	$A \cdot (A+B)=A$
分配律	$A+(B \cdot C)=(A+B) \cdot (A+C)$	$A \cdot (B+C)=(A \cdot B)+(A \cdot C)$

首位事件可逐层分解为各项基本事件，但并非所有基本事件对于首位事件的发生都有同样重要的作用。在基本事件的各种组合（也可以是单一的基本事件）中，所有基本事件都发生时首位事件才发生的组合叫 CS 组合，也称失效树的一个割集。导致首位事件发生的充分且必要的 CS 组合又称最小 CS 组合。最小 CS 组合也是失效树的一个最小割集，即若 C 是一个割集，而 C 中任意去掉一个基本事件后就不是割集，称 C 是一个最小割集。通常最小 CS 组合不止一组。找出最小的 CS 组合，就为防止首位事件发生提供了采取必要措施的途径。为了寻找最小 CS 组合，就有必要对 FT 图进行整理简化。下面，根据图 8-13 所示某系



由图 8-13 知：

$$G_4 = x_1 + x_2; \quad G_5 = x_2 + x_3,$$

$$G_6 = x_1 + x_3; \quad G_3 = x_4 \cdot x_5$$

$$G_2 = G_4 \cdot G_5 \cdot G_6$$

由表 8-9 知， $x_1 + x_1 = x_1$ ， $x_1 \cdot x_1 = x_1$ 因此，

$$\begin{aligned} G_2 &= (x_1 + x_2) \cdot (x_2 + x_3) \cdot (x_1 + x_3) \\ &= (x_1 \cdot x_2 + x_1 \cdot x_3 + x_2 \cdot x_2 + x_2 \cdot x_3)(x_1 + x_3) \\ &= x_1 \cdot x_2 + x_1 \cdot x_3 + x_2 \cdot x_3 + x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \end{aligned}$$

$$T = G_1 = G_2 + G_3$$

$$= x_1 \cdot x_2 + x_1 \cdot x_3 + x_2 \cdot x_3 + x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 + x_4 \cdot x_5 \quad (8 \cdot 2 \cdot 7)$$

由式 (8·2·7) 得到事件乘积和的各项中，基本事件所组成的组合 $\{x_1, x_2\}$ ， $\{x_2, x_3\}$ ， $\{x_1, x_2, x_3\}$ ， $\{x_4, x_5\}$ 是 FT 图的 CS 组合，但不都是最小 CS 组合。用最小 CS 组合，即最小割集的定义就可判断，除

$\{x_1, x_2, x_3\}$ 外, 其余 4 个都是最小割集, 即最小 CS 组合, 而且是全体最小 CS 组合。从此方法可以看到, FT 图的首位事件可以用全体最小 CS 组合中基本事件的乘积的和来表示, 即

$$T = x_1 \cdot x_2 + x_1 \cdot x_3 + x_2 \cdot x_3 + x_4 \cdot x_5 \quad (8 \cdot 2 \cdot 8)$$

此式称为 FT 图的最小 CS 组合表示式。

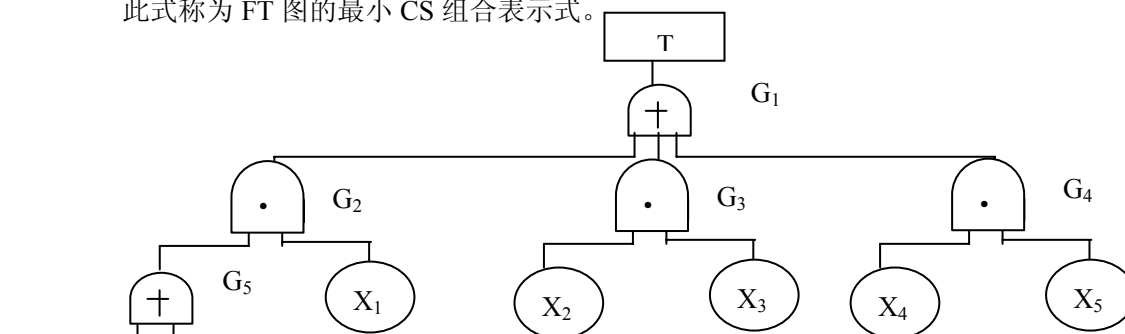


图 8-14 系统 S 的 FT 简化图

可用下述方法检验 CS 组合中哪些是最小 CS 组合, 哪些不是: 对于每个基本事件依次对应一个素数 p_i , 把每个 CS 组合也对应于一个数, 它是 CS 组合中相应基本事件对应的素数之乘积。于是一个失效树 (FT 图) 有 S 个 CS 组合, 就对应了 S 个数, 将这 S 个数从小到大排列, 得 N_1, N_2, \dots, N_s , 则 N_1 所对应的 CS 组合就一定是最小 CS 组合。若 N_2 能被 N_1 整除, 则说明 N_2 所对应的 CS 组合去掉一个基本事件后得到的仍是一个 CS 组合, 所以 N_2 不是最小 CS 组合。若 N_2 不能被 N_1 整除, 则 N_2 所对应的 CS 组合也是最小的 CS 组合。对每个都 N_i 判定一下, 最后剩下的一些相互不能整除的数, 它们对应得 CS 组合就是 FT 图的全体最小 CS 组合。

例如, 在图 8-13 中所给出的 S 的 FT 图中, 令: x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 分别对应素数 2, 3, 5, 7, 11。则前面得到的 CS 组合所对应的数分别为 6, 10, 15, 30, 77。由于 30 可以被 6、10 整除, 所以 $\{x_1, x_2, x_3\}$ 不是最小 CS 组合。其余 4 个是最小的 CS 组合。

3. FTA 解析的基本步骤

(1) 明确解析对象。FTA 的解析对象可以是产品, 也可以是一个“系统”。明确解析对象就是要掌握其构成、人物、使用方法及使用环境等, 特别要注意收集以往类似产品、系统在使用中出现的恶性事件及主要故障。

(2) 选定首位事件。对于同一个解析对象, 可以选择不同的首位事件。首位事件根据其对完成任务的影响大小可分作致命级、重大级和轻微级。一次 FTA 解析只能针对一项首位事件展开。首位事件的选择直接关系到 FTA 解析效果的好坏。

(3) 分解首位事件。分解的基本原则是分解到不便分解的基本事件为止。分解时应注意明确各下位层次的各事件 (中间事件、基本事件) 与上位层次的事件之间的逻辑关系。

(4) 作 FT 图。即利用事件记号与逻辑记号将分解的结果绘制成 FT 图。

(5) 简化 FT 图。运用布尔代数知识简化了的 FT 图与原先所作的 FT 图是完全等价的。简化后的 FT 图便于构造重要度计算, 寻找最小 CS 组合, 以及进行首位事件发生概率的定量计算。

(6) 计算首位事件的发生概率。计算时首先要求出各基本事件的发生概率, 若无法得到各基本事件的发生概率, 这一步也可略去不作。

(7) 提出分析的结论和改善措施。分析评审结论应包括各基本事件的构造重要度, 最小 CS 组合, 即各基本事件对上位层次及首位事件的影响程度。可能是还应估算首位事件的发生概率。对于危险的基本事件, 改善的措施必须连同分析的结论一起提交。

经上述步骤分析评审后, 组织落实改善措施, 并检查是否有遗漏的应展开的事件, 若遗漏了真正的基本事件, 则 FTA 解析就得不到预期的效果。

8.2.3 FMECA 和 FTA 的比较

FMECA 和 FTA 法虽然都可用于产品设计评审, 但两者在分析程序、分析对象和分析效果上是不相同的。

FMECA 的分析对象是硬件产品 (单元) 的设计确定, 对每个单元设定故障模式, 然后向上追溯个故障模式的影响, 分析是遗漏的可能性小。解析程序简单, 比较能完善和有条件地评价设计, 不足之处是只能考虑单一的故障, 不宜考虑人为的错误和环境因素等的影响。

FTA 法是从选择最上次的首位事件开始, 然后向下分析导致上层事件发生的硬件故障、软件故障和人为差错, 一直向下分析到故障是可以找到确切的基本组成要素为止。不仅可以分析硬件、而且可以分析软件、人为差错、阴谋破坏及自然因素影响各种因素, 但不能保证在分析中不出现遗漏。

复习思考题

- 1、有甲、乙两种摩托车，甲生产成本为 500 元，乙为 800 元；每年的维修费用：甲 100 元，乙 60 元。若使用年限都是 10 年，在不考虑其它情况的条件下，你认为生产哪种产品社会效益较高？
- 2、站在用户的立场，希望质量好、价格低；如从生产者的角度来考虑产品价值，则希望投入资金少，而收益要大。显然这两者的希望是有一定的矛盾，请你考虑如何使矛盾统一，做到二者兼顾。
- 3、为什么说价值分析要着眼于降低寿命周期成本，而不是单纯追求降低制造成本，这有何意义？
- 4、什么是功能？功能分析在整个价值分析中起着什么样的作用？
- 5、提高价值的途径有哪些？
- 6、功能分析的目的是什么？
- 7、功能评价的目的是什么？
- 8、功能整理的目的是什么？
- 9、什么叫基本功能？什么叫辅助功能？
- 6、功能之间的关系有哪几种类型？
- 10、什么叫价值分析？
- 11、描述功能评价的基本步骤。
- 12、根据下表数据求各功能的功能价值和改进期望值，并确定各功能改进的优先顺序。

功能	现实成本 C	功能评 价值 F	V 值	Cd 值	功能改 进顺序
F1	45	30			
F2	60	28			
F3	120	90			
F4	75	75			
F5	20	12			
合计	320	235			

- 13、设某产品构成的功能系统中，有 7 项功能需进行评价，相关资料如下表所示。假设现实总成本为 129 元，目标成本为 90.3 元，试确定各功能改进的优先次序。

功能	功能 分 f_i	现实成本 C_i	功能评价系数 F_{Ii}	成本系数 C_{Ii}	V_{Ii}	CM_i	$C_i - CM_i$	改进 次序
A	2.2	12.0						
B	5.3	8.5						
C	4.3	7.2						
D	9.0	22.3						
E	7.6	8.0						
F	5.7	45.6						
G	1.9	20.4						
合计	40.0	129						

- 14、某产品共有 A、B、C、D、E、F、G、H 等 8 种零部件，现以这 8 种零部件为分析对象，请你用 0-1 强制确定法绘制功能评分表，并求出功能评价系数。再用目前成本计算出成本系数、价值系数。假设该产品的目标成本为 6000 元，请给出相应的改进顺序。计算需要的条件见下表：

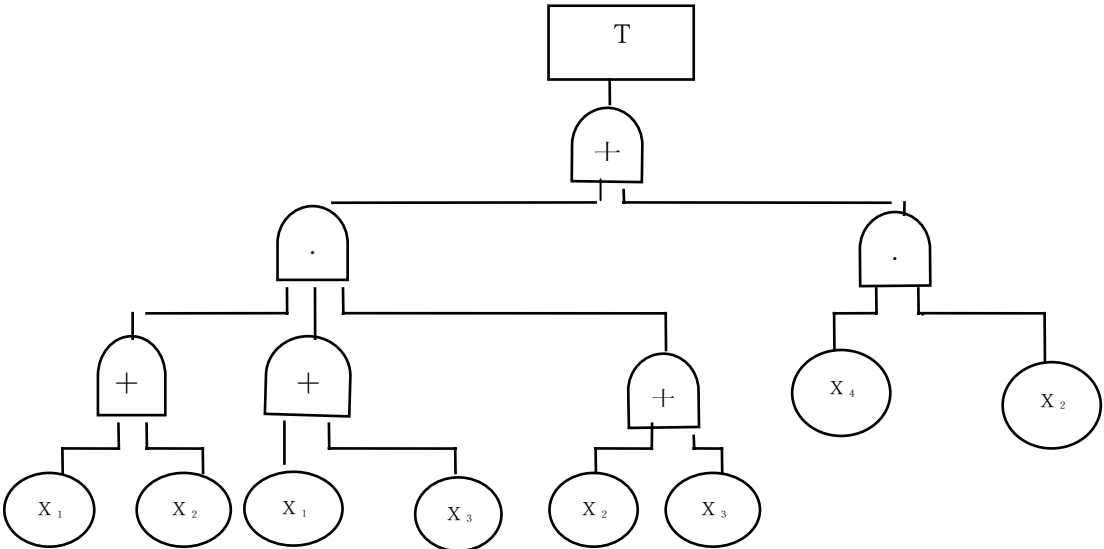
零部件	一对一功能比较结果	目前成本
A	与 B、C、E、F、G、H 比，重要；与 D 比，则次要	1818 元

B	与 C、E、F、G、H 比，重要；与 A、D 比，则次要	3000 元
C	与 E、F、G 比，重要；与其余零部件比，则次要	285 元
D	与所有零部件比，D 都是重要	284 元
E	与所有零部件比，D 都是重要	284 元
F	与 E、G 比，重要；与其余零部件比，则次要	407 元
G	与所有零部件比，G 都次要	82 元
H	与 C、E、F、G 比，重要；与其余零部件比，则次要	720 元

[技能练习]

- 一、训练目的与要求
通过训练，使学生掌握 FTA 分析的基本思路，并能运用 FTA 方法确定控制目标。
- 二、训练过程与结果
提供练习题，由学生先独立完成，然后根据学生做的结果进行讲评。

【系统 S 的 F T 图化简】



系统 S 的逻辑代数式： $T = (X_1 + X_2) \cdot (X_2 + X_3) \cdot (X_1 + X_3) + X_2 \cdot X_4$

进行逻辑运算：

$$T = (X_1 X_2 + X_1 X_3 + X_2 + X_2 X_3) (X_1 + X_3) + X_2 \cdot X_4$$

$$= X_1 X_2 + X_1 X_3 + X_2 X_3 + X_1 X_2 X_3 + X_2 \cdot X_4$$

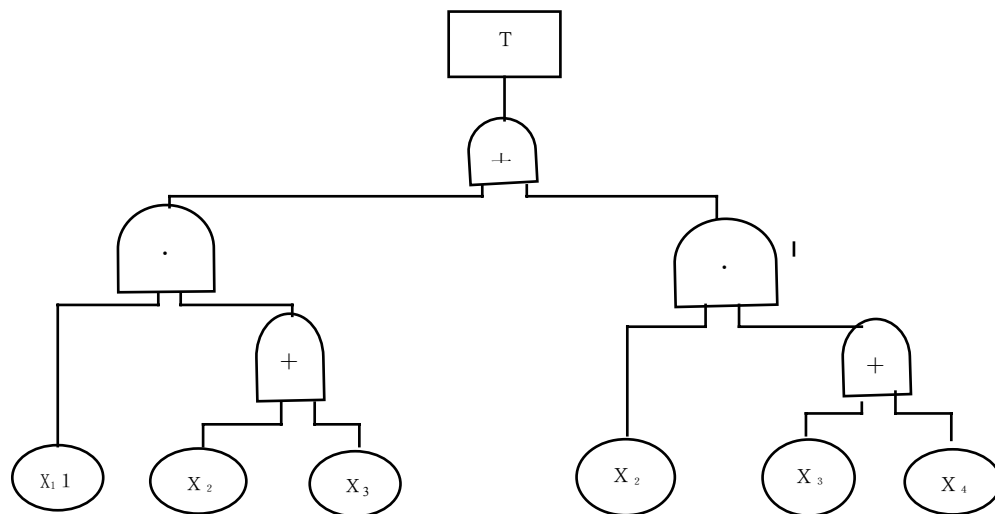
T 的 C S 组合是 $\{ X_1 , X_2 \}$; $\{ X_1 , X_3 \}$; $\{ X_2 , X_3 \}$; $\{ X_1 , X_2 , X_3 \}$; $\{ X_2 , X_4 \}$ 。

T 的最小 C S 组合是： $\{ X_1 , X_2 \}$; $\{ X_1 , X_3 \}$; $\{ X_2 , X_3 \}$; $\{ X_2 , X_4 \}$;

故 $T = X_1 X_2 + X_1 X_3 + X_2 X_3 + X_2 \cdot X_4 = X_1 (X_2 + X_3) + X_2 (X_3 + X_4)$

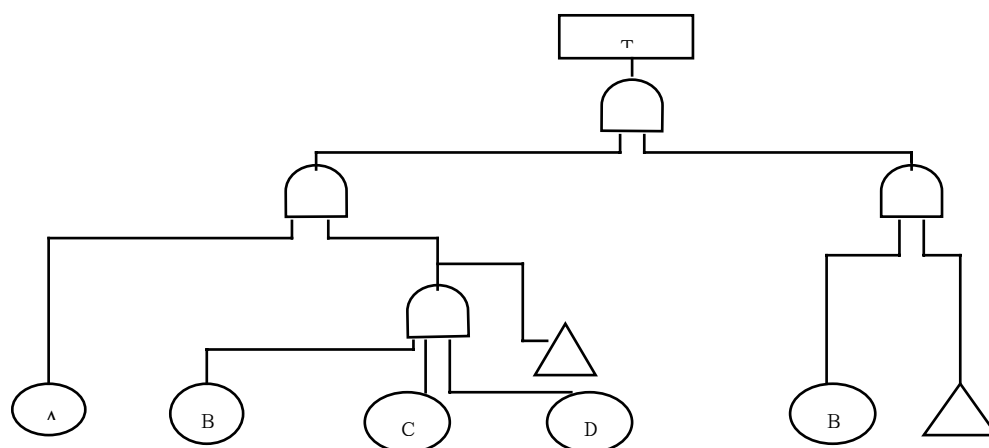
系统 S 的 F T 简图如下图示

$$T = X_1 (X_2 + X_3) + X_2 (X_3 + X_4)$$



实例：

【系统M的F T图】



系统M的逻辑代数式：

$$T = A(B+C+D) + B(B+C+D)$$

逻辑代数运算：

$$T = A(B+C+D) + B(B+C+D)$$

$$= AB + AC + AD + B + BC + BD$$

$$= B + B(A+C+D) + A(C+D)$$

$$= B + A(C+D)$$

控制系统不出故障，仅控制

B、A就可达到控制目标。

