

第五章 面向质量的设计

第一节 三次设计

一、概述

三次设计理论是日本著名质量管理专家田口玄一博士于20世纪70年代创立的一种系统化设计方法,其核心思想是在产品设计阶段就进行质量控制,试图用最低的制造成本生产出满足顾客要求的、对社会造成损失最小的产品。与传统的产品设计概念不同,田口玄一将产品的设计过程分成三个阶段,即系统设计、参数设计和容差设计。三次设计的重点在参数设计,国外称为健壮设计或鲁棒设计(Robust Design)。

事实上,田口玄一的质量保证理论自成体系,它的理论基础是田口质量观、质量损失函数、信噪比和正交试验设计法。他将产品质量控制分为线内质量控制和线外质量控制。线外质量控制就是采用三次设计法对产品进行质量设计。线内质量控制侧重于制造过程中对产品质量进行控制,分为工序诊断与调整、预测与校正、检验与处理。上述理论体系如图5-1所示。

在田口的理论体系中,核心是他提出的新质量观,这种质量观的特点是将质量与经济性紧密地联系在一起,这种联系用质量损失函数来表示。所以,质量损失函数是田口质量理论的一个重要内容。信噪比和正交试验法是参数设计的重要方法。可以认为田口质量理论的重点是三次设计,而三次设计的重点又是参数设计。



图5-1 田口玄一质量理论体系

二、田口质量观

一般认为,产品质量就是用户对产品满意程度的度量,用户越满意,则产品的质量就越高。但用户的满意程度是个无法量化的概念,无法定量计算。所以,长期以来,人们习惯于用合格、不合格来度量质量,只要产品合格,则认为质量过关,产品的合格率指标越高,合格产品的质量就越高。但是,同为合格产品,用户的满意程度是否相同?合格产品是否也存在不同的质量等级?如何度量?为了定量度量产品的质量,田口博士将质量与经济性挂钩,提出了一种新的质量定义,他把产品的质量与产品上市后给社会造成的损失联系在一起,认为社会损失的大小就直接反映了质量的高低。因此,同为合格品,上市后给社会造成损失小的产品,它的质量就高。用社会损失来度量质量,将质量与经济性紧密地结合起来,使质量变成可量化度量的量,这是田口博士对质量工程学的重大贡献之一。

全国Mini-MBA职业经理双证班



精品课程 权威双证 全国招生 请速充电

你可能准备跳槽或者求职, 却为缺少行业经验和专业证书而被用人单位百般挑惕!

你可能目前衣食无忧, 但随着年龄的增长和社会竞争压力的增大, 因为得不到专业的全新培训而失去竞争的机会和面临被淘汰的危机。

美华教育携手中国经济管理大学面向全国举办迷你 MBA 职业经理双证书班, 毕业颁发双证书。

招生专业及其颁发证书

认证项目	颁发双证	学费
全国《职业经理》MBA 高等教育双证书班	高级职业经理资格证书+2 年制 MBA 高等教育研修结业证书	1280 元
全国《人力资源总监》MBA 双证书班	高级人力资源总监职业经理资格证书+2 年制 MBA 高等教育研修证书	1280 元
全国《生产经理》MBA 高等教育双证班	高级生产管理职业经理资格证书+2 年制 MBA 高等教育研修结业证书	1280 元
全国《品质经理》MBA 高等教育双证班	高级品质管理职业经理资格证书+2 年制 MBA 高等教育研修结业证书	1280 元
全国《营销经理》MBA 高等教育双证班	高级营销经理资格证书+2 年制 MBA 高等教育研修结业证书	1280 元
全国《物流经理》MBA 高等教育双证班	高级物流管理职业经理资格证书+2 年制 MBA 高等教育结业证书	1280 元
全国《项目经理》MBA 高等教育双证班	高级项目管理职业经理资格证书+2 年制 MBA 高等教育研修结业证书	1280 元
全国《市场总监》MBA 高等教育双证书班	高级市场总监职业经理资格证书+2 年制 MBA 高等教育研修结业证书	1280 元
全国《酒店经理》MBA 高等教育双证班	高级酒店管理职业经理资格证书+2 年制 MBA 高等教育研修结业证书	1280 元
全国《企业培训师》MBA 高等教育双证班	企业培训师高级资格认证毕业证书+2 年制 MBA 高等教育研修证书	1280 元
全国《财务总监》MBA 高等教育双证班	高级财务总监职业经理资格证书+2 年制 MBA 高等教育研修结业证书	1280 元
全国《营销策划师》MBA 双证书班	高级营销策划师高级资格认证证书+2 年制 MBA 高等教育研修证书	1280 元
全国《企业总经理》MBA 高等教育双证班	全国企业总经理高级资格证书+2 年制 MBA 高等教育研修结业证书	1280 元
全国《行政总监》MBA 高等教育双证班	高级行政总监职业经理资格证书+2 年制 MBA 高等教育结业证书	1280 元
全国《采购经理》MBA 高等教育双证班	高级采购管理职业经理资格证书+2 年制 MBA 高等教育结业证书	1280 元
全国《医院管理》MBA 高等教育双证班	高级医院管理职业经理资格证书+2 年制 MBA 高等教育结业证书	1280 元
全国《企业管理咨询师》MBA 双证班	高级企业管理咨询师资格证书+2 年制 MBA 高等教育结业证书	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】 学员毕业后可以获取权威双证书与全套学员学籍档案

- 1、毕业后可以获取相应专业钢印《高级职业经理资格证书》;
- 2、毕业后可以获取2年制的《MBA研究生课程高等教育研修结业证书》;



【证书说明】

1. 证书加盖中国经济管理大学钢印和公章（学校官方网站电子注册查询、随证书带整套学籍档案）;
2. 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，证书是学员求职、提干、晋级的有效证明；。



【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2年以上相应工作经验者可以申请提前毕业）。
- 2、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24小时接受在线咨询，第一时间回答学员的提问和咨询）



【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。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】

美华管理人才学校是中国最早由教委批准成立的“工商管理MBA实战教育机构”之一，由资深MBA教育专家、教育协会常务理事徐传有教授担任学校理事长。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，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》。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。



【咨询电话】13684609885 0451--88342620

【咨询教师】王海涛 郑毅

【学校网站】<http://www.mhjy.net>

【咨询邮箱】xchy007@163.com



【报名须知】

- 1、报名登记表格下载后详细填写并发送邮件至 xchy007@163.com (入学时不需要提交相片，毕业提交试卷同时邮寄4张2寸相片和一张身份证复印件即可)
- 2、交费后请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。



【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】可以选择以下任意一种方式缴纳学费

方式一	学校地址	<p>邮寄地址：哈尔滨市道外区南马路 120 号职工大学 109 室</p> <p>邮政编码：150020 收件人：王海涛</p>
方式二	学校帐号	<p>学校帐号：184080723702015</p> <p>账号户名：哈尔滨市道外区美华管理人才学校</p> <p>开户银行：哈尔滨银行龙江支行</p> <p>支付系统行号：313261018018</p>
方式三	交通银行 (太平洋卡)	<p>帐号：40551220360141505 户名：王海涛</p> <p>开户行：交通银行哈尔滨分行信用卡中心</p>
方式四	邮政储蓄 (存折)	<p>帐号：602610301201201234 户名：王海涛</p> <p>开户行：哈尔滨道外储蓄中心</p>
方式五	中国工商银行 (存折)	<p>帐号：3500016701101298023 户名：王海涛</p> <p>开户行：哈尔滨市道外区靖宇支行</p>
方式六	建设银行帐户 (存折)	<p>中国人民建设银行帐户 (存折)： 1141449980130106399</p> <p>用户名：王海涛</p>
方式七	农业银行帐户 (卡号)	<p>农业银行帐户 (卡号)： 6228480170232416918 用户名：王海涛</p> <p>农行卡开户银行：中国农业银行黑龙江分行营业部道外支行景阳支行</p>

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。

<http://www.mhgy.net>

三、质量损失函数

田口博士认为,即使是合格品(输出质量特性在用户要求的公差范围内),其输出特性的波动仍可给用户和社会造成损失,输出特性越远离其目标值,造成的损失就越大。因此,输出特性应尽量接近其目标值,以使用户更满意。为了度量合格品输出特性偏离目标值给用户造成的损失,田口博士建议用质量损失函数(Quality Loss Function)。

设产品输出特性的值为 y ,其目标值为 m ,质量损失为 $L(y)$ 。当 $y=m$ 时, $L(y)$ 为零,达到最小,意味着此时没有质量损失。无论输出特性值是变大还是变小,只要偏离其目标值 m ,就会给用户造成损失 $L(y)$,两者之间的关系可以用下面的关系式来描述,称为质量损失函数。

$$L(y) = k(y - m)^2$$

其中, k 是比例常数,可以根据已知条件定量求出。质量损失函数用图形表示,如图5-2所示。

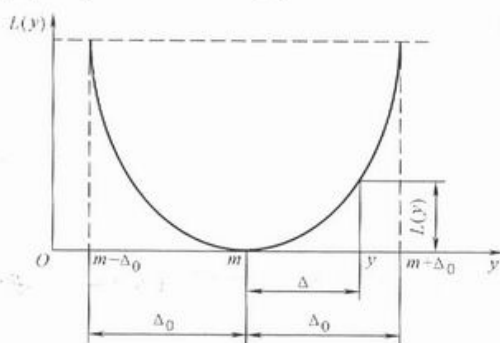


图 5-2 质量损失函数

图中, $2\Delta_0$ 为用户要求的公差范围。

在三次设计中,质量损失函数主要用于容差设计中。

四、三次设计的内容

田口博士将产品设计过程分成三个阶段,即系统设计、参数设计和容差设计。

1. 系统设计(第一次设计)

系统设计是指根据产品规划所要求的功能,利用专业知识和技术对该产品的整个系统结构和功能进行设计。其主要目的是确定产品的主要性能参数、技术指标及外观形状等重要参数。系统设计是产品设计的基础,它在很大程度上决定了产品的性能和成本,影响到用户是否接收该产品。系统设计是在调研的基础上,对比同类产品提出并确定技术参数。在系统的整体方案确定后,还要画出产品总图及部件总图。可以看出,系统设计相当于传统的概念设计加结构设计。为了提高系统设计的质量,可采用计算机辅助设计、面向制造的设计、面向装配的设计、面向使用的设计、面向维修的设计、面向拆卸的设计等现代设计技术,也可以应用并行设计、虚拟制造等先进技术,以及质量功能配置技术。

2. 参数设计(第二次设计)

三次设计的重点是参数设计,参数设计有时又叫健壮设计或鲁棒设计。利用参数设计可以使用公差范围较宽的廉价元件组装出高质量的产品,其实质是利用产品输出特性和元件参数水平之间的非线性效应,如图5-3所示。

当参数为 x_1 或 x_2 时,对于同样的参数公差,输出特性 y 的变化 Δy_1 和 Δy_2 是不同的。因此在设计时,应尽量将元件参数确定在 x_2 附近。参数设计的主要任务之一就是采用一定的技术,确定系统中有关的参数值及其最优组合,其目的是提高质量和降低成本。通过参数设计,系统的参数值可以进行合理搭配,从而有可能用廉价的元器件组装出性能良好的整

机。此外,通过选择最佳参数值,还可使系统输出特性对各种干扰不敏感。在产品使用过程中,即使各种干扰现象出现,但输出特性值的波动依然控制在某一允许的范围内。这样的产品稳定性好,抗干扰能力强。

通常,一个产品由许多零部件组成,寻找这些零部件参数的最佳组合并不是一件容易的事。一般可以分以下两种情况来对待:

(1) 当输出特性与零部件参数间无法建立适当的数学模型时,田口博士建议采用正交试验法来完成这个任务。正交试验法是借助于正交表来进行

的,可以用很少的试验次数求得较好的结果。正交试验法实质上是一种寻优方法,对输出特性和参数之间无明显数学关系的试验寻优特别适合。为了衡量产品输出特性的稳定性,田口建议采用信噪比。信噪比是信号与噪声的比值,其值越大越好。这部分内容详见本章第三节。

(2) 当输出特性与零部件参数间可以建立数学模型时,有人建议采用数学规划法求解最佳参数值。用数学规划法进行设计时,其数学模型可描述为:

$$\begin{aligned} \min \quad & |y - m| \\ & y = f(x, \Delta x, p, \Delta p, \Delta b) \\ \text{s. t.} \quad & g(x, \Delta x, p, \Delta p, \Delta b) \leq 0 \\ & L_x \leq x \leq U_x \\ & 0 < \Delta x \leq U_{\Delta x} \\ & L_{\Delta b} \leq \Delta b \leq U_{\Delta b} \end{aligned}$$

式中, m 为输出特性目标值; y 为输出特性计算值; x 为可控因素变量矢量; Δx 为可控因素变量的误差矢量; p 为标示因素给定值矢量; Δp 为标示因素波动值矢量(给定值); Δb 为其他误差因素(干扰)变量矢量。

按上述数学模型求出的各种参数可保持产品在各种干扰因素下运行的稳定性,达到健壮设计的目的。但由于未考虑制造成本因素,并不能保证制造成本为最小。所以,可以进行公差优化设计,即令各最佳参数为已知值,得到各个公差与输出特性变化量的数学关系,建立制造成本模型,并以成本模型为目标函数,以输出特性的变化量作为约束,进行制造成本最小化条件下的公差设计,最终得到制造成本低、工作稳定性好的产品。

3. 容差设计(第三次设计)

参数设计完成后,就可开始确定零部件的容差(机械设计中称为公差设计),容差设计的目的是确定各个参数容许的误差大小。在一个系统中,由于结构不同,各个参数对系统输出特性的影响就不同,它取决于误差的传递路线。容差设计的基本思想是对影响大的参数给予较小的公差值,对影响小的参数给予较大的公差值,从而在保证质量的前提下使系统的总成本为最小。对于容差设计,田口建议采用损失函数法,这部分内容见本章第四节。近20年来,人们开始采用优化设计法结合公差成本模型来进行容差设计,且已取得较好的

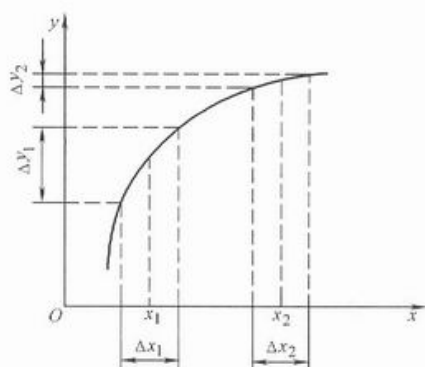


图 5-3 参数水平与输出特性之间的关系

效果。

五、三次设计与传统设计法的比较

作为一种先进的质量设计方法，三次设计方法与传统设计有如下主要区别：

1. 对客户需求重视程度不同

传统产品的研制和设计方法以工程师和经理们的意见为主，而三次设计则以市场为牵引，以客户的需求为准绳。

2. 设计目标及评价标准不同

传统设计以产品满足验收标准的上、下限为目标，即使是合格产品，质量也存在着较大的波动。当产品不能满足客户要求时，往往用缩小容差指标的办法来控制产品质量，这样会造成大量的超差报废现象，经济性差。三次设计则是以客户所要求的指标为目标值，用参数设计方法来控制产品的质量波动，使产品性能稳定在目标值附近，对产品的设计质量的评价采用信噪比和质量损失函数。由于质量波动和质量损失的减小是无止境的，因此，产品质量的改进需持续不断地进行。

3. 着重点不同

如图 5-4 及表 5-1 所示，传统设计在产品开发的设计阶段没有投入足够的力量，会造成产品生命力的先天不足；到了制造与装配阶段，甚至到了投入使用后，问题层出不穷。采用三次设计则相反，设计师的主要精力集中在产品开发设计阶段，使产品的质量很高，生产阶段就比较顺利，进入市场后很少出现返修现象。

表 5-1 产品设计活动的分配

	美 国	日 本
系统设计	70%	40%
参数设计	2%	40%
容差设计	28%	20%

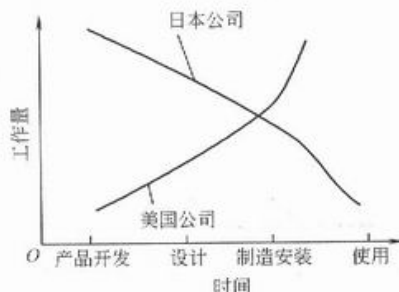


图 5-4 产品研制过程工作量的分配

4. 在工程更改的次数和分布上有明显差别

如图 5-5 所示，传统设计在产品研制后期有大量的工程更改，甚至局部或全部重新设计，造成人力、物力的极大浪费和时间的拖延。而按三次设计方式，大部分工程更改都出现在产品研制早期，而且在图样上进行，从而大大降低了成本，缩短了研制周期。

5. 主导思想不同

传统设计方式是被动应付式的，只有当产品的问题暴露出来后才着手解决。而三次设计方式则是积极主动的，通过采取各种手段，把可能出现的问题消灭在“萌芽”状态，可以增强产品的“体质”和“生命力”，从根本上提高了产品的质量和可靠性。

6. 产生的经济效益和社会效益不同

利用传统设计方式设计的产品成本高、质量不稳定，常常不能满足或不能全部满足顾客的需求，从而损害企业的声誉，丢失市场份额。而采用三次设计方式设计的产品成本低、质

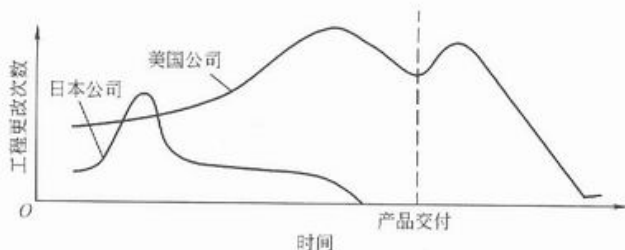


图 5-5 美国公司与日本公司设计更改次数的比较

量高，受到了顾客的青睐，带来了良好的经济效益和社会效益。

因此可以认为，三次设计的指导思想是以顾客的要求为设计目标，采用质量功能配置、参数设计、容差设计等方法优化设计方案，在设计阶段把问题尽可能多地解决，以最小的代价获得高质量、高可靠性的产品。

第二节 质量功能配置

QFD

一、质量功能配置概述

质量功能配置 QFD (Quality Function Deployment) 又称为质量功能展开。质量功能配置是一种在设计阶段应用的系统方法。它采用一定的方法保证将来自顾客或市场的需求精确无误地转移到产品寿命循环每个阶段的有关技术和措施中去。

QFD 于 20 世纪 70 年代初起源于日本的三菱重工，后来被日本其他公司广泛采用，现已成为一种重要的质量设计技术，得到世界各国的普遍重视，认为它是满足顾客要求、赢得市场竞争和提高企业经济效益的有效技术。QFD 首先成功地应用于船舶设计与制造中，现在已扩展到汽车、家电、服装、集成电路、建筑机械、农业机械等行业。

实施 QFD 后，企业收到的效益是巨大的。日本丰田公司应用 QFD 技术后，从 1979 年 10 月到 1984 年 4 月，开发新的集装箱车辆费用累积降低 61%，产品开发周期减少 1/3，而质量也有了较大的提高。

QFD 是一种系统性的决策技术，在设计阶段，它可保证将顾客的要求准确无误地转换成产品定义（具有的功能，实现功能的机构，零件的形状、尺寸、公差等）；在生产准备阶段，它可以保证将反映顾客要求的产品定义准确无误地转换为产品的制造工艺过程；在生产加工阶段，它可以保证制造出的产品完全满足顾客的需求。在正确应用的前提下，QFD 技术可以保证在整个产品寿命循环中，顾客的要求不会被曲解，可以避免出现不必要的冗余功能，可以使产品的工程修改减至最少，还可以减少使用过程中的维修和运行消耗，追求零件的均衡寿命和再生回收。正是由于这些特点，QFD 真正成为了一种可以使制造者以最短的时间、最低的成本，生产出功能上满足顾客要求的高质量产品的技术。

QFD 之所以可以取得很好的效果，其原因在于它强调“Team Work”（团队）工作方式，也提供了比较严格规范的工具使得各方面的专家可以按照一定的工作程序一步一步地实现“要求”和“措施”之间的映射，并可得出应重点进行质量控制的项目。

二、质量功能配置的原理和方法

质量功能配置是采用一定的规范化方法将顾客所需特性转化为一列工程特性。所用的基本工具是“质量屋”。质量屋的基本形式如图 5-6 所示。

图中①是对顾客需求和权重的描述，是质量屋的“什么”；②是对产品的工程技术特性描述，是质量屋的“如何”；③是顾客需求和工程技术特性之间的关系矩阵，描述了它们之间的相互关系；④是产品的竞争性评估，从顾客的角度评估产品质量在市场上的竞争力；⑤是技术特性之间的相关关系矩阵；⑥是技术竞争性评估、技术特性重要度和目标值，用来确定应优化配置的项目和重点保证的质量特性。图 5-7 表示了顾客需求与工程技术特性之间的关系矩阵。矩阵中的元素一般可用符号表示，通常用五种符号表示两者之间的关系：强正相关、弱正相关、弱负相关、强负相关和不相关；也可表示为强相关、中等相关、弱相关、不相关。这些符号如图 5-7 所示。

在有些情况下，顾客的需求可能是不明确的，在建立关系矩阵时需要逐步识别、定义和细化，以便在工程技术上定量确定工程技术特性。

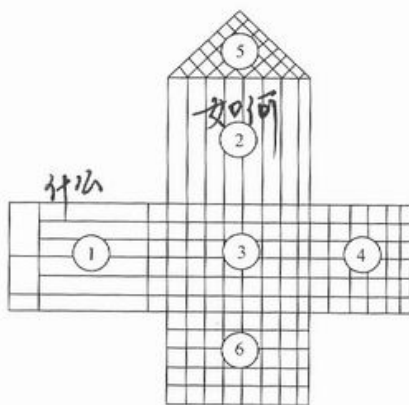


图 5-6 质量屋

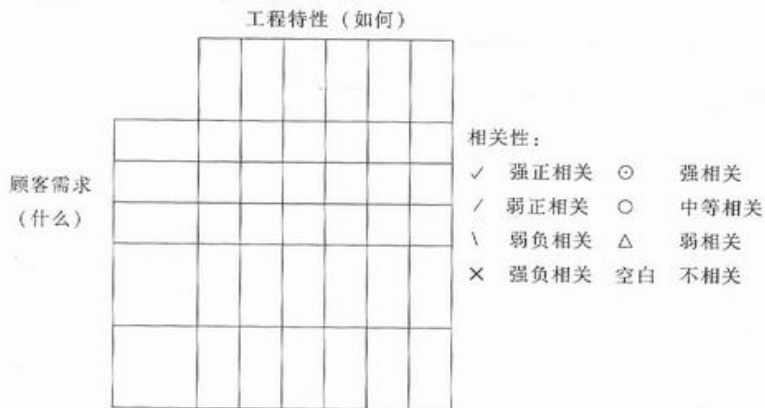


图 5-7 关系矩阵

现在通过汽车车门的实例来进一步说明。通过市场调研和深入访问，已掌握顾客对汽车的需求是多方面的。其中汽车车门要求中有一项“操作性能良好”。这项顾客需求可进一步分解，如表 5-2 所示。顾客需求分解到什么层次，应根据具体情况以便于定量操作为准。

顾客需求特性之间会有一定的联系，例如车门上电动车窗要易于关闭，快速动作就需要较大功率的电动机，这就会使车门加重而使车门关闭时不太方便。在设计时应统筹考虑有关问题，有时不得不在几种选择之间折衷。顾客需求特性中并不是所有要求都是同等重要的，应在充分考虑顾客意愿的基础上，确定出全部顾客需求特性的相对重要性。如果产品有竞争

对手,企业要想以质取胜超过对手,就应通过调研,掌握顾客对本企业的产品及对竞争对手的产品质量特性的评价。表 5-3 表示了顾客需求特性的相对重要性及顾客的评价。

表 5-2 汽车车门顾客需求特性分解

一	二	三
操作性能良好	1. 开启关闭特性	1. 易于从外部关闭 2. 在斜坡上可保持开门状态 3. 易于从外部开启 4. 不反弹 5. 易于从内部关闭 6. 易于从内部开启
	2. 密封性	1. 不漏雨 2. 无(或低)公路噪声 3. 洗车时不渗水 4. 无风声 5. 开门时不滴水 and 雪 6. 无“格格”声
	3. 扶手	1. 柔软舒适 2. 在右面位置

表 5-3 顾客需求特性相对重要性及顾客评价

顾客需求特性	顾客需求特性分解	重要性	顾客评价(意见)
车门易于开启、关闭	易从外部关闭	7	1 2 3 4 5 坏 <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> 好
	在斜坡上可保持开门状态	5	坏 <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> 好
密封性	不漏雨	3	坏 <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> 好
	无公路噪声	2	坏 <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> 好

○我们的车 □对手 A 的车 △对手 B 的车

与竞争对手比较一下,就可以发现有质量改进的机会。例如在“无公路噪声”项目中,本企业已经有了优势,应继续保持。在“斜坡上可保持开门状态”项目上,每一种汽车都不理想,在这里我们有获得优势的机会。在“车门易于从外部关闭”项目上,顾客对本公司产品的评价不很理想,该项目应是质量改进的重点所在。

怎样才能改进产品质量呢?顾客需要“什么”已经清楚,我们应该“如何”做?这就需要用工程的语言,也就是用生产过程有关人员都懂得的语言来描述生产特性,即根据顾客的需求特性设计出可定量表示的工程技术特性。这就需要有顾客需求特性和工程技术特性的关系矩阵图(图 5-8)。在这个关系矩阵中,顾客需求特性项目列在矩阵图的左边,工程特性项目列在矩阵图的上方,两种特性之间的关系用符号表示就一目了然。关系矩阵有助于人们对复杂事物进行清晰思维,并提供机会对思维的正确性反复交叉检查。如果发现某项工程技术特性项目与任何一项顾客需求特性没有关系,那么这项工程技术特性就可能是多余的,或者设计小组在设计时漏掉了一项顾客需求特性。如果某项顾客需求特性与所列的任何工程

技术特性都没有关系,那么,就有可能要增加产品的工程技术要求,在工程技术上应加以满足。

顾客特性			开关力				密封—隔音	
			关门动力	平地上的阻力	10°斜坡上的阻力	...	车门密封性	减少公路噪声
易于开关	易于从外部关闭	7	✓				×	
	在斜坡上可保持开门状态	5		✓	✓			
	⋮							
密封性	不漏雨	3					✓	
	无公路噪声	2					/	✓
	⋮							

图 5-8 顾客需求特性和工程特性的关系矩阵

关系矩阵图中的每一项工程技术特性可能与一项顾客需求特性有关,也可能与多项顾客需求特性有关,如车门的密封性在图 5-8 中就与三项顾客需求特性有关。另外工程技术特性之间也可能互相关联。例如扩大或加强车窗开关的机电操作机构,会使车门变重难以开启或在斜坡上不宜保持开门状态。当然也可能有一种完善的新机构能使所有相关的工程技术特性都得到改善。工程技术特性应能创造性地协助达到各种目标。

顾客特性			工程特性				
			关门动力	平地上的阻力	10°斜坡上的阻力	车门密封性	减少公路噪声
易于开关	易于从外部关闭	7	✓			×	
	在斜坡上可保持开门状态	5		✓	✓		
	⋮						
密封性	不漏雨	3				✓	
	无公路噪声	2				/	
	⋮						

图 5-9 关系矩阵图

质量屋的屋顶矩阵描述了各工程技术特性项目之间的相关性,如图 5-9 所示。例如,

“车门密封性”与“无公路噪声”是正相关，“关门动力”和“车门密封性”、“无公路噪声”是负相关等。屋顶矩阵包含了对工程设计的重要信息，因为当设计师考虑满足顾客需求时要用这个矩阵来作平衡。

在质量屋中，为使工程技术特性定量化，尚需有“客观测量值”栏目，应系统地、仔细地分析、比较和确定工程技术特性项目的客观测量值。

质量屋的基本应用是倾听顾客的意见，捕捉顾客的愿望，很好地理解顾客的需求，并将顾客需求特性设计到产品中去，合理确定各种技术要求。应该为每一项工程技术特性确定定量的特性值，例如，关门动力用所需的力矩表示，关门动力可能与车门的重量有关，车门重量可能与所选用的钢板厚度有关。相比之下，钢板厚度是顾客不易感觉到的特性，只是通过车门重量或抗撞击变形来间接影响用户。质量功能配置过程通过质量屋全面确定各种工程技术特性和间接工程技术特性的值。在质量屋每一项工程技术特性下加上对应的顾客测量值（图 5-10），根据顾客测量值来设计每项工程技术特性的理想值，即目标值。

如果某项产品同时有几家公司生产，则公司之间存在着产品质量的竞争。这时质量屋可提供本公司的产品质量与主要竞争对手产品质量的比较。在图 5-10 中，质量屋矩阵的右边为顾客对各项顾客需求特性的评价，分别按本公司的产品及竞争对手产品的质量以五级记分来评价。质量屋的下面分别列出了本公司的车门和竞争对手车门的各工程技术特性的客观测量值。这样，在质量屋中既有顾客需求特性及其重要性的信息，又有与顾客需求特性相关的工程技术特性信息及工程技术特性之间的相互关系信息，再加上对顾客需求特性和工程技术特性的竞争性评价，就可以借此分析判断本公司工程技术特性的规范是否符合顾客要求，同时也可以确定质量改进所在。

例如，“车门易于从外部关闭”这一顾客需求特性比较重要，而顾客的评价又不怎么高，我们应重点研究与该特性正相关的关门动力是否合适。另外，在技术项目的目标值方面还应考虑该项技术实现的难度、重要性及经济性等因素，考虑这些因素后的质量屋又扩展了，如图 5-11 所示。

由图 5-11 可以看到，关门动力与最大关门力正相关，与其他工程技术特性，如平面上的阻力、车门密封阻力、车窗隔音性、减少公路噪声等负相关。根据现实的客观测量值，考虑到顾客的需要、技术难度和成本等因素，销售人员、工程技术人员和高层管理者共同商定了一个新的目标——关门动力为 $10\text{N} \cdot \text{m}$ 。

再考察一下顾客需求特性“无公路噪声”，这一项目对顾客只是一般重要，与“车窗的隔音性”正相关，与“关门动力”、“最大关门力”等负相关。比较起来，“易于关门”对于顾客比“安静”更重要。市场调研结果表明，本公司在“无公路噪声”这一项目上已经做得很好。在这种情况下，决定不改变“减少公路噪声”和“车窗隔音性”的技术指标。

质量屋的基本应用是将顾客的需求转化为设计要求。例如，“易于关门”是一项重要的顾客需求特性，根据以上的分析，可以得到设计要求，即设置了关门动力的目标值。这是质量屋应用的核心阶段，或者说是第一阶段。由于仅靠这一阶段还不能得到一扇车门，因此，还需要相应的零件，如门框、钢板、挡风雨条和铰链等，然后经过零件的加工和制作，最终把车门装配起来。



图 5-10 有竞争性评价的质量屋

三、质量功能配置的应用

利用质量功能配置把客户要求展开成设计参数后，还可以继续往下一阶段展开。在上例中，质量功能配置的第一阶段是展开成车门设计参数，第二阶段为零件设计展开阶段。“零件”的含义包括元件、组件或部件以及材料配方、成分等。零件展开阶段将会把由产品规划阶段得到的第一个质量屋转化为第二个质量屋（图 5-12）。在展开过程中，第一个质量屋的设计要求（如何做）会转化为第二个质量屋的设计要求（做什么），在第二个质量屋中，再根据产品设计要求（做什么）来确定零件的技术特性（如何做），从而进行零件的选择及设计。例如，车门关门动力的数值在这里展开成零件特性，如钢板厚度、铰链性能、挡风雨条的厚度等。

从图 5-12 可以看出，要将顾客的需求最终转换成对制造的要求，一般需要成系列的四个质量屋。其中，产品规划阶段的质量屋将顾客的需求转换成对产品的设计需求；零件设计阶段的质量屋又将产品设计要求转换成零件特性；工艺设计阶段的质量屋将零件特性转换成工序参数；最后通过制造计划阶段的质量屋将工序参数转换成零件或产品的制造要求。这四个质量屋构成一个从设计到制造的质量屋系列。

质量功能配置的典型应用是在产品的设计开发方面以及产品设计后的生产制造方面，但也可用于公司的办公室和非制造过程的策略规划方面，图 5-13 表明了用于策略规划方面的质量功能配置的示意图。下面举例说明。

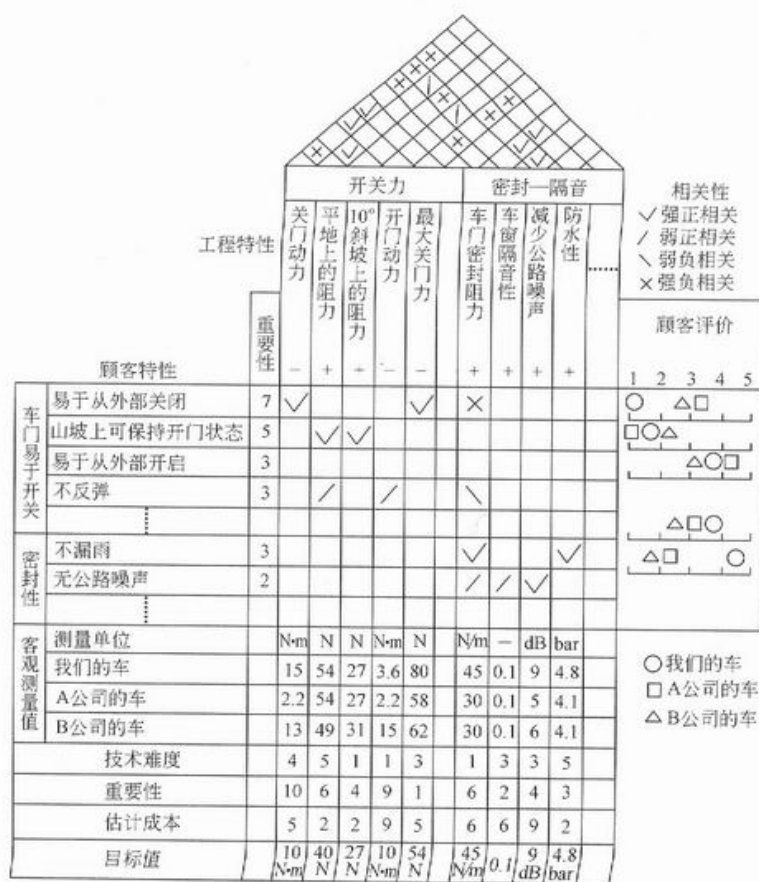


图 5-11 比较完整的质量屋

一个机床制造公司根据顾客的需求和公司的具体情况确定了下列任务：

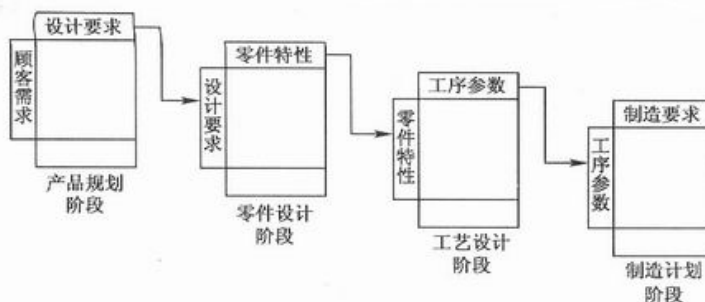


图 5-12 质量功能配置的质量屋系列

- (1) 改进产品的质量和可靠性。
- (2) 减少新产品的交货时间和成本。

这些任务（做什么）应被分解为下列更具有操作性的目标（做什么）：①减少每月停工事故的次数（增加平均故障间隔时间）。②引进改进了的柔性制造系统（FMS）。③减少专

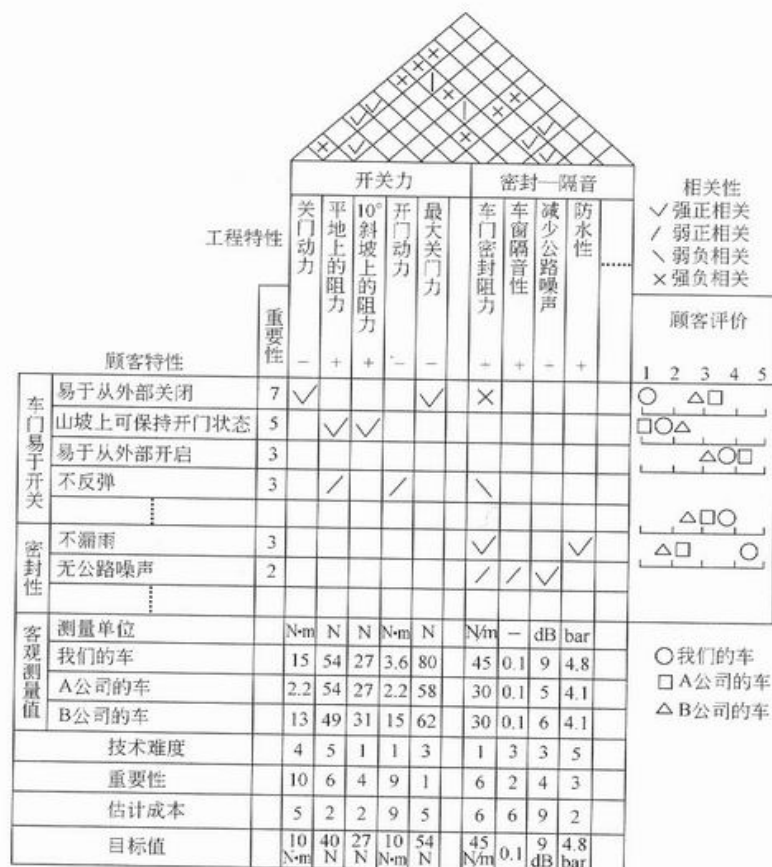


图 5-11 比较完整的质量屋

一个机床制造公司根据顾客的需求和公司的具体情况确定了下列任务：

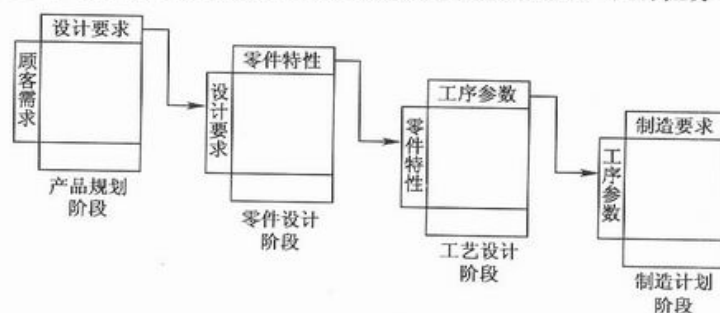


图 5-12 质量功能配置的质量屋系列

(1) 改进产品的质量和可靠性。

(2) 减少新产品的交货时间和成本。

这些任务（做什么）应被分解为下列更具有操作性的目标（做什么）：①减少每月停工事故的次数（增加平均故障间隔时间）。②引进改进了的柔性制造系统（FMS）。③减少专

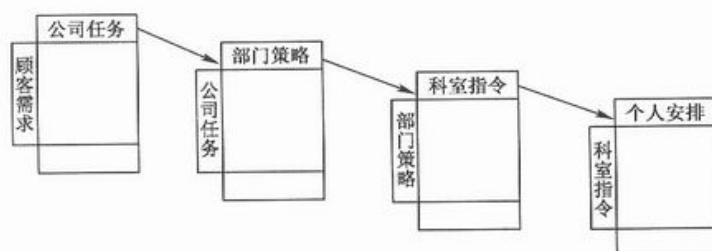


图 5-13 用于策略规划的 QFD

门订货的交货时间。④在现有产品的升级过程中降低成本。

根据上述任务和目标，企业准备采取以下几项策略：①与供应商一起实施并行工程。②在设计阶段应用田口方法和质量功能配置。③为顾客开设定期维护机床知识的培训课程。

将以上任务、目标和采用策略用质量功能配置方法展开，如图 5-14 所示。然后根据策略制定相应的指令：①建立内部多功能研制小组。②改进采购程序以鼓励更新的工作关系。③建立一个定期维修的服务部门。④为管理人员安排入门性的、为技术人员安排专业性的田口方法和质量功能配置的培训。

采用质量功能配置将策略展开成指令，以便于具体实施，如图 5-15 所示。

图 5-15 中的策略相当于“做什么”，指令为“如何做”，在关系矩阵的下面充实各项量化的指标：①在 12 月 31 日前聘任多功能产品研制小组人员 15 名。②在 12 月 31 日前准备一份典型的采购手册。③在 12 月 31 日前作好维修服务部门的人事安排。④在 12 月 31 日前培训完 5 位经理和 15 位工程师。

		策略		
		与供应商一起实施并行工程	在设计阶段应用田口方法和 QFD	为顾客开设定期维护机床知识的培训
改进产品的质量与可靠性	减少每月停工事故次数（增加 MTBF）	○	◎	◎
	引进经过改进的柔性制造系统	○	◎	
减少新产品的交货时间和成本	减少专门订货的交货时间	◎	○	
	在现有产品升级过程中降低成本	○	◎	

◎ 强相关
○ 中等相关
△ 弱相关

图 5-14 机床制造公司的质量策略

策略	◎ 强 ○ 中等 △ 弱			
	建立内部多功能产品研制小组	改进采购程序以鼓励更新的工作关系	建立一个定期维修的服务部门	安排入门性和专业性的田口方法和质量功能配置的培训
与供应商一起实施并行工程	◎	◎	△	○
在设计阶段应用田口方法和 QFD	◎	○		◎
为顾客开设定期维护机床的培训			◎	
指标	在 12 月 31 日前聘任 15 人	在 12 月 31 日以前准备一份典型的采购手册	在 12 月 31 日前作好人事安排	在 12 月 31 日以前培训完 5 位经理和 15 位工程师

图 5-15 策略展开为指令

四、计算机辅助质量功能配置

随着质量功能配置在企业界应用的不断扩大,人们逐渐发现质量功能配置具有应用较复杂、文件量很大的缺点。例如美国 DEC 公司应用的质量功能配置矩阵元素达 100×100 个,计算分析的工作量极大。因此,促使人们将计算机技术引入到 QFD 中,探索计算机辅助 QFD 的方法,提高应用 QFD 的效率。将计算机技术引入 QFD 中,就能使用软件开发工具自动生成文档并进行文档处理,使得文档的处理和维护实现自动化。在 QFD 应用过程中,计算机与当代数学和人工智能技术的结合,不仅能够很快地完成计算任务(例如用计算机对技术需求的绝对重要性、相对重要性、对技术需求进行排序等),而且能够快速完成逻辑推演,使需要长时间才能完成的工作量,或者需要多年才能得到的实践经验总结可以在极短的时间内完成,为在 QFD 过程中进行多种产品设计方案的最佳选择提供了现实可能性。目前,计算机辅助 QFD 已成为企业应用 QFD 的客观要求和有效手段。计算机辅助 QFD 的一般结构如图 5-16 所示。

系统中各主要模块的功能如下:

(1) 顾客需求编辑器。顾客需求编辑器模块主要为用户输入、修改顾客需求提供了一个友好的界面环境,同时在检索类似产品需求库的基础上,向用户提供一定数量的帮助和咨询。

(2) 顾客需求评估。顾客需求评估主要负责检查顾客需求的一致性和完善程度,同时为用户评估顾客需求的重要程度提供友好的界面环境和帮助。

(3) 顾客需求报告产生。根据用户定制的报告格式,从数据库中检索相关的数据,输出顾客需求报告。

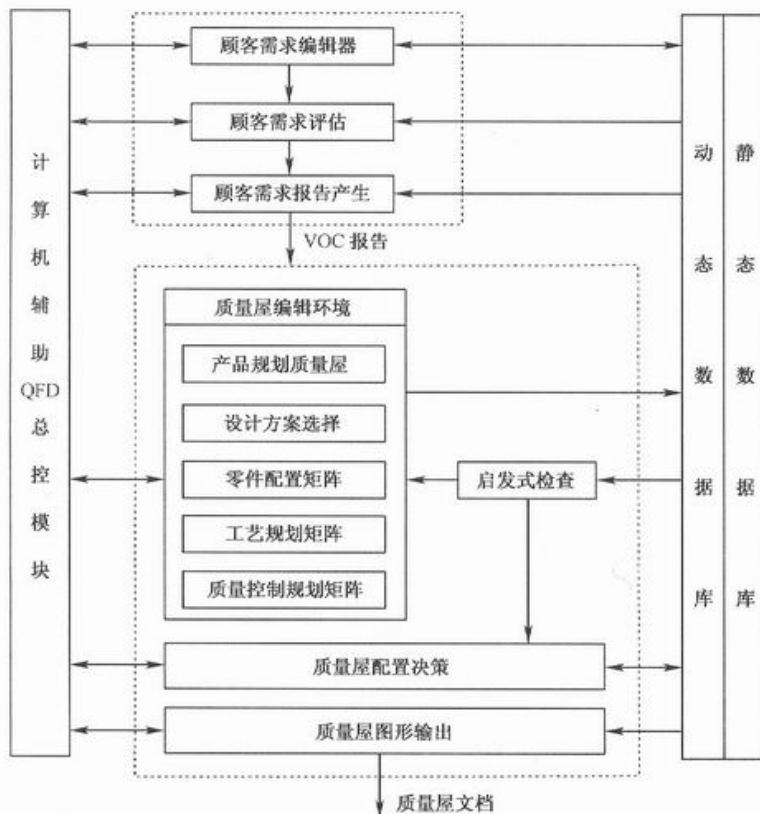


图 5-16 CAQFD 的一般结构

(4) 质量屋编辑模块。它包括五个子模块，即产品规划质量屋编辑器、零件配置矩阵编辑器、工艺规划矩阵编辑器、质量控制规划矩阵编辑器、产品设计方案选择模块等。其中前几个模块主要负责对应质量屋的输入和修改工作，同时向用户提供一定的在线帮助。最后一个模块负责产品设计方案的选择和择优，按照一定的决策方法对各种产品设计方案进行比较和评估，在全面考虑各个评价准则的基础上，迅速帮助用户选择最佳方案。

(5) 启发式检查模块。检查质量屋的关系矩阵中是否有空行或空列存在。如某一行为空或只有“弱”关系符号，则建议用户增加新的“如何”；如某一列为空或只有“弱”关系符号，则建议用户删除该“如何”。同时，计算关系矩阵中关系符号的填充率，判断关系符号的填充率是否在规定范围内，否则对关系矩阵进行修改。根据启发式规则，检查产品规划质量屋中的顾客竞争性评估和技术竞争性评估结果是否一致。在两者不一致时，建议与用户一起分析原因。

(6) 质量屋配置项目决策。在一定资源约束下，按照合适的决策方法，对各种因素进行全面考虑，综合分析，帮助选择待配置的项目，以使顾客满意度最大。

(7) 质量屋图形输出。从数据库中检索有关信息，按照用户定制的格式，输出质量屋的图形文档。

(8) 数据库。数据库分为动态数据库和静态数据库。动态数据库主要用来存放中间结果

信息。对计算机辅助 QFD 来说,采用数据库技术可以有效地访问和操纵数据,实现数据共享,减少数据的冗余度,保持数据的一致性和独立性,同时提供了安全访问机制。

第三节 参数设计

在完成系统设计以后,就应该确定系统各元器件参数的最佳值。所谓参数设计,就是运用正交试验法或优化方法确定零部件参数的最佳组合,使系统在内、外因素的作用下,所产生的质量波动最小,即质量最稳定(或健壮)。

如前所述,参数设计又叫健壮设计,它的目的是采取一切措施,保证产品输出特性在其寿命周期内保持稳定。所谓稳定性,是指产品在各种干扰因素的作用下,其输出特性能稳定地保持在一个尽可能小的范围内(波动很小)。由此可见,与参数设计有关的两个主要概念就是质量波动和干扰因素。在本节中,我们首先介绍质量波动和干扰因素的概念,然后分别介绍望目特性、望小特性和望大特性三种特性的参数设计方法。

一、质量波动及干扰因素

我们已经知道,在完全相同的条件下生产出来的产品,其质量特性是参差不齐的,具有波动性,表现的质量特性也不一样,这种现象称为质量的波动性。质量波动是不以人的意志为转移的。完全消除质量波动是不可能的,但减少质量波动却是可能的。参数设计的根本目的就是减少质量波动,设计出质量稳定、可靠的产品。

引起质量波动的干扰因素可以分为以下五类:

(1) 可控因素。它是为改进产品质量,减少输出特性值的波动,以选取最适宜水平为目的而提出考察的因素。可控因素的值应在一定范围内自由选择(如时间、温度、材料种类和切削速度等)。

(2) 标示因素。它是指维持环境使用条件等的因素。标示因素的值(即水平)可以在技术上指定,但不能加以选择和控制。研究标示因素的目的不在于选取其最佳水平,而是研究标示因素与可控因素之间有无交互作用,从而确定最佳方案的使用范围(如转速、电压、环境的温度和湿度等)。

(3) 区组因素。它是指持有水平,但在技术上不能指定其水平,同时在不同时间、空间还可以影响其他因素效应的因素。例如,在加工某种零件时,如果由不同操作者在不同班次、使用不同原材料批号、在不同的机器上进行加工时,上述因素就是区组因素。事实上,在参数设计中考虑区组因素无任何实际意义,其目的在于提高检出精度和试验精度。

(4) 信号因素。它是指为了实现某种意志或为了实现目标值所要求的结果而选取的因素,例如机械装配中的调整环。

(5) 误差因素。所谓误差因素,是指除了上述四种因素以外的所有其他因素。产品输出特性值的波动正是由于各种误差因素形成的。常考虑的误差因素有:外干扰、内干扰和物品间干扰三种。

所谓外干扰,是指产品在使用或运行过程中,由于环境因素(如温度、湿度和电压等)的波动或变化而带来的干扰。这种干扰会影响产品的工作质量,使输出特性产生波动。所谓内干扰,是指产品在有效期和使用过程中,随着时间的推移发生了老化或劣化,从而影响了

产品的输出特性。如电阻值随时间的变化,运动部件之间的磨损均属内干扰。所谓物品间干扰,是指同一批产品之间输出特性的变动。这种变动是客观存在的。因为即使按同一规格生产出来的产品,由于各种条件的变化,输出特性总是参差不齐的。通过控制工艺过程的5MIE(人员、设备、物料、操作规程、环境、检测),可以显著减少物品间干扰。

事实上,参数设计包括两项内容:第一项是考虑各种因素,选择最佳参数值,使产品对各种干扰的反应“不灵敏”;第二项内容是研究减少各种干扰因素之间的“干扰性”。

二、望目特性的参数设计

所谓望目特性,是指产品的质量特性 y 服从正态分布 $N(\mu, \sigma^2)$, 且存在固定的目标值 m , 此时的 y 值即为望目特性。一个理想的设计, 应该是 $\mu = m$, 且 σ^2 很小。望目特性的参数设计遵循以下步骤:

1. 望目特性的信噪比(SN比)公式

设由 n 件样品测得望目特性 y 的数据为 y_1, y_2, \dots, y_n , 根据数理统计知识, μ 和 σ^2 的无偏估计分别为:

$$\hat{\mu} = \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (5-1)$$

$$\hat{\sigma}^2 = V_e = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (5-2)$$

μ^2 的无偏估计为:

$$\hat{\mu}^2 = \bar{y}^2 - \frac{V_e}{n} = \frac{1}{n} (n\bar{y}^2 - V_e) \quad (5-3)$$

令 $S_m = n\bar{y}^2 = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2$, 并代入式(5-3)则有:

$$\hat{\mu}^2 = \frac{1}{n} (S_m - V_e) \quad (5-4)$$

定义信噪比为 $\hat{\mu}^2$ 与 $\hat{\sigma}^2$ 的比值, 即:

$$\hat{\eta} = \frac{\hat{\mu}^2}{\hat{\sigma}^2} = \frac{(S_m - V_e)/n}{V_e} \quad (5-5)$$

借用通信理论, 在实际计算时, 将取常用对数后再乘以 10, 化为以分贝(dB)为单位的信噪比, 记作:

$$\eta = 10 \lg \frac{(S_m - V_e)/n}{V_e} (\text{dB}) \quad (5-6)$$

这就是望目特性信噪比的计算公式。

如果说 μ^2 代表了有效信号, σ^2 为噪声, 那么信噪比就是“有效信号与噪声的比值”。像收音机, 往往随着所收信号的增强, 相应的噪声也会增强, 因此对其质量的评价, 应该采用信噪比。

广义地讲, 信噪比就是研究对象的有效部分与无效部分的比值。

2. 可计算场合参数设计

可计算场合参数设计是指输出目标值与设计参数值之间有确定函数关系条件下的参数设

计。

例 5-1 根据需要,设计一种驱动器,专业人员经过认真分析,决定采用机械驱动方式。设驱动器的设计输出为:

$$F = K \left(\frac{BCD^2}{A} + EIGHJ \right)$$

其中, F 为无量纲驱动力, $K = \pi/2$ 为常数, $J = 1.16$ 为常数, A 、 B 、 C 、 D 、 E 、 I 、 G 、 H 为部件参数。无量纲驱动力 F 是望目特性,其目标值为 $m = F_0 = 4.5$ 。要求选择 A 、 B 、 C 、 D 、 E 、 I 、 G 、 H 等参数,使系统在参数有波动(误差)的条件下,能稳定地达到输出特性 F 的要求。

(1) 区分可控因素及误差因素。在构成驱动器的部件中,可控因素共有七个,它们分别是 A 、 B 、 C 、 D 、 E 、 I 和 G 。

如前所述,误差因素是产生波动的主要原因。为了区分误差因素和可控因素,常常在英文字母的右上角加标志“'”来表示误差因素。如“ A' ”表示 A 因素是误差因素。如果因素 B 既是可控因素又是误差因素,可记作“ B ”和“ B' ”。在构成驱动器的部件中,误差因素共有八个,它们是 A' 、 B' 、 C' 、 D' 、 E' 、 I' 、 G' 和 H' 。

根据需要和经验,对可控因素和误差因素的研究可以有所选择,如为了减少计算次数,可对其中的几个因素加以研究。如果条件允许,对全部因素都加以研究,无疑会得到更多的信息。

(2) 确定可控因素水平。通常,以设计人员开始考虑的一组参数作为可控因素的第二水平。第一、第三水平可采用等差或等比数列来确定,而且其(差或比)值尽量取得大一些,以便使研究的范围更广。

在驱动器这一例子中,工程设计人员所确定的第二水平为:

$$A = 650, B = 20, C = 2, D = 8, E = 0.7, G = 1.31, I = 0.57$$

按等差数列来确定第一、第三水平,得到可控因素水平表(表 5-4),可见此例为七因素水平。

表 5-4 可控因素水平表

水平 因素	第一水平	第二水平	第三水平
A	600	650	700
B	10	20	30
C	1	2	3
D	4	8	12
E	0.4	0.7	1
I	0.47	0.57	0.67
G	0.88	1.31	1.74

(3) 内设计。在正交试验法中,安排可控因素的正交表称为内表,相应的试验设计称为内设计。由于此例中可控因素比较多,可以利用正交表 $L_{36}(3^{13})$ 安排试验方案。其中, L 表示正交表, 36 表示有 36 个试验方案, 3 表示每个参数有三个水平, 13 表示正交表有 13 列。表头设计为:

列 号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
因 素	A	B	C	D	E	I	G						

空列作为误差列。用来作内设计的内表如表 5-5 所示。

表 5-5 内表及信噪比数据

No.	A	B	C	D	E	I	G	e	e	e	e	e	e	η/dB
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	6.192
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	6.158
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	6.216
4	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	1	6.607
5	2	2	2	2	3	3	3	3	1	1	1	1	1	6.372
6	3	3	3	3	1	1	1	1	2	2	2	2	1	5.996
7	1	1	2	3	1	2	3	3	1	2	2	3	1	5.866
8	2	2	3	1	2	3	1	1	2	3	3	1	1	9.134
9	3	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	1	6.144
10	1	1	3	2	1	3	2	3	2	1	3	2	1	6.090
11	2	2	1	3	2	1	3	1	3	2	1	3	1	6.015
12	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	2	1	1	7.481
13	1	2	3	1	3	2	1	3	3	2	1	2	2	8.315
14	2	3	1	2	1	3	2	1	1	3	2	3	2	6.028
15	3	1	2	3	2	1	3	2	2	1	3	1	2	3.822
16	1	2	3	2	1	1	3	2	3	3	2	1	2	6.026
17	2	3	1	3	2	2	1	3	1	1	3	2	2	6.021
18	3	1	2	1	3	3	2	1	2	2	1	3	2	7.003
19	1	2	1	3	3	3	1	2	2	1	2	3	2	6.038
20	2	3	2	1	1	1	2	3	3	2	3	1	2	6.341
21	3	1	3	2	2	2	3	1	1	3	1	2	2	6.216
22	1	2	2	3	3	1	2	1	1	3	3	2	2	5.988
23	2	3	3	1	1	2	3	2	2	1	1	3	2	6.240
24	3	1	1	2	2	3	1	3	3	2	2	1	2	6.725
25	1	3	2	1	2	3	3	1	3	1	2	2	3	6.206
26	2	1	3	2	3	1	1	2	1	2	3	3	3	6.250
27	3	2	1	3	1	2	2	3	2	3	1	1	3	6.210
28	1	3	2	2	2	1	1	3	2	3	1	3	3	6.036
29	2	1	3	3	3	2	2	1	3	1	2	1	3	6.179
30	3	2	1	1	1	3	3	2	1	2	3	2	3	6.403
31	1	3	3	3	2	3	2	2	1	2	1	1	3	5.988
32	2	1	1	1	3	1	3	3	2	3	2	2	3	6.973
33	3	2	2	2	1	2	1	1	3	1	3	3	3	6.120
34	1	3	1	2	3	2	3	1	2	2	3	1	3	6.027
35	2	1	2	3	1	3	1	2	3	3	1	2	3	6.123
36	3	2	3	1	2	1	2	3	1	1	2	3	3	6.575

(4) 确定误差因素水平。误差因素通常取三个水平，也有取两个水平的。误差因素取三个水平时，其第二水平依赖于内设计，是由内设计中方案给出参数值定义为“中心值”，该中心值因方案不同而不同。第一、第三水平在第二水平的基础上等差或等比减少或增加一定的量。本例中误差因素取三个水平，A~G的第二水平值由内表中 No. 3 方案给出，H 由设计人员给出（给定值 1.5）。第一、第三水平由计算得出。第一水平 = 中心值 - 中心

值 $\times 10\% = 0.9 \times$ 中心值, 第二水平 = 中心值, 第三水平 = 中心值 + 中心值 $\times 10\% = 1.1 \times$ 中心值, 即以 $\pm 10\%$ 波动作为第一、第三水平。对应于内表第三号试验方案的水平值如表 5-6 所示, 对应于内表其他各次试验的误差因素水平表依此类推。

由于内设计中共有 $n=36$ 个方案, 所以有 36 张误差因素水平表。

表 5-6 内表中 No. 3 方案的误差因素水平表

因 素	第一水平	第二水平	第三水平
A'	630	700	770
B'	27	30	33
C'	2.7	3	3.3
D'	10.8	12	13.2
E'	0.9	1	1.1
F'	0.6	0.67	0.74
G'	1.57	1.74	1.91
H'	1.35	1.5	1.65

(5) 外设计。安排误差因素和信号因素的正交表称为外表, 相应的设计称为外设计。我们仍然选用 $L_{36}(3^{13})$ 正交表进行外设计。为不失一般性, 我们把 A', B', \dots, H' 八个误差因素依次排列在正交表 $L_{36}(3^{13})$ 中的第一列至第八列上。其余为空列。以内表中 No. 3 的条件为例, 根据表 5-6, 得到相应的外表如表 5-7 所示。按相应的外表, 可计算出 36 个特征值 (驱动力 F), 将计量值减目标值 m ($m=4.5$), 得到偏差值 y , 即 $y=F-4.5$, 把这些 y 值填入表 5-7 中。

表 5-7 内表中 No. 3 条件的外表及偏差值

No.	A'	B'	C'	D'	E'	F'	G'	H'	e	e	e	e	e	$y = F - 4.5$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	19.018
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	27.781
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	⋮
4	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	3	⋮
5	2	2	2	2	3	3	3	3	1	1	1	1	1	⋮
6	3	3	3	3	1	1	1	1	2	2	2	2	2	⋮
7	1	1	2	3	1	2	3	3	1	2	2	3	1	⋮
8	2	2	3	1	2	3	1	1	2	3	3	1	1	⋮
9	3	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	1	⋮
10	1	1	3	2	1	3	2	3	2	1	3	2	1	⋮
11	2	2	1	3	2	1	3	1	3	2	1	3	1	⋮
12	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	2	1	1	⋮
13	1	2	3	1	3	2	1	3	3	2	1	2	2	⋮
14	2	3	1	2	1	3	2	1	1	3	2	3	2	⋮
15	3	1	2	3	2	1	3	2	2	1	3	1	2	⋮
16	1	2	3	2	1	1	3	2	3	3	2	1	2	⋮
17	2	3	1	3	2	2	1	3	1	1	3	2	2	⋮
18	3	1	2	1	3	3	2	1	2	2	1	3	2	⋮
19	1	2	1	3	3	3	1	2	2	1	2	3	2	⋮
20	2	3	2	1	1	1	2	3	3	2	3	1	2	⋮
21	3	1	3	2	2	2	3	1	1	3	1	2	2	⋮
22	1	2	2	3	3	1	2	1	1	3	3	2	2	⋮
23	2	3	3	1	1	2	3	2	2	1	1	3	2	⋮
24	3	1	1	2	2	3	1	3	3	2	2	1	2	⋮

(续)

No.	A'	B'	C'	D'	E'	F'	G'	H'	e	e	e	e	e	$y = F - 4.5$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
25	1	3	2	1	2	3	3	1	3	1	2	2	3	∴
26	2	1	3	2	3	1	1	2	1	2	3	3	3	
27	3	2	1	3	1	2	2	3	2	3	1	1	3	
28	1	3	2	2	2	1	1	3	2	3	1	3	3	∴
29	2	1	3	3	3	2	2	1	3	1	2	1	3	
30	3	2	1	1	1	3	3	2	1	2	3	2	3	
31	1	3	3	3	2	3	2	2	1	2	1	1	3	
32	2	1	1	1	3	1	3	3	2	3	2	2	3	
33	3	2	2	2	1	2	1	1	3	1	3	3	3	
34	1	3	1	2	3	2	3	1	2	2	3	1	3	
35	2	1	2	3	1	3	1	2	3	3	1	2	3	
36	3	2	3	1	2	1	2	3	1	1	2	3	3	22.206

现以外表中 No. 1 为例, 说明计算过程。

$$\begin{aligned}
 y_1 &= F_1 - 4.5 = K \left(\frac{BCD^2}{A} + EIGHJ \right) - 4.5 \\
 &= \frac{\pi}{2} \left(\frac{27 \times 2.7 \times 10.8^2}{630} + 0.9 \times 0.6 \times 1.57 \times 1.35 \times 1.16 \right) - 4.5 \\
 &= 19.018
 \end{aligned}$$

仿此, 可求出内表中 No. 3 条件对应外表的 36 个偏差值 y_1 至 y_{36} 。由于内表中每一条件均对应一个外表, 所以共有 36 张外表, $36 \times 36 (= 1296)$ 个方案。

(6) 计算信噪比。对于内表中的每个试验方案, 均可以设计出相应的外表, 并由输出特性计算式求得 36 个驱动力, 求出相应的 36 个 y_1, y_2, \dots, y_{36} ; 然后再由这 36 个偏差值求出一个信噪比 η 。我们仍以内表中 No. 3 条件为例, 说明如何求出信噪比。

首先求出 36 个偏差值的平均值和均方差:

$$\begin{aligned}
 \bar{y} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i = \frac{1}{36} \times (19.018 + 27.781 + \dots + 22.206) = 28.03 \\
 V_e &= \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = 251.242
 \end{aligned}$$

再由式 (5-4) 和式 (5-6) 求出信噪比 η :

$$\begin{aligned}
 S_m &= \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n F_i \right)^2 = \frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^n (y_i + m) \right]^2 = \frac{(162 + 1\,009.08)^2}{36} = 38\,095.232 \\
 \eta &= 10 \lg \frac{(S_m - V_e)/n}{V_e} = 10 \lg \frac{(38\,095.232 - 251.242)}{36 \times 251.242} \text{dB} = 6.216 \text{dB}
 \end{aligned}$$

仿此, 可求出内表中其余 36 张外表的信噪比 η , 结果如表 5-5 所示。

(7) 内表的统计分析。内表的统计分析对象是信噪比 η 。它是衡量内表中方案稳健性的指标。首先计算出每个因素 ($A \sim G$ 共七个因素) 各水平 (三个水平) 下 η 的合计值 (即各列中与各个水平相应的 η 值之和) 及平均值, 结果如表 5-8 所示。

$$\text{在表 5-8 中, } T_1 = 6.192 + 6.607 + \dots + 6.027 = 75.381, \quad \bar{T}_1 = \frac{T_1}{12} = \frac{75.381}{12} = 6.282$$

然后计算各种波动平方和与自由度。

表 5-8 方差分析辅助表

	因素 水平	A	B	C	D	E	I	G
合计值	T_1	75.381	85.037	75.374	83.471	73.636	77.359	75.381
	T_2	77.834	73.355	78.517	74.184	80.493	77.442	80.728
	T_3	79.903	74.725	79.227	75.463	78.988	78.317	77.009
平均值	\bar{T}_1	6.282	7.086	6.281	6.956	6.136	6.447	6.282
	\bar{T}_2	6.449	6.113	6.543	6.182	6.705	6.454	6.727
	\bar{T}_3	6.659	6.227	6.602	6.289	6.582	6.526	6.417

总波动 S_T 为各方案所对应的信噪比与平均信噪比之差的平方和, 其自由度 f_T 为各种因素中能独立变化因素的个数。 S_i 为 i 因素取不同水平所引起的波动的平方和, 其自由度 f_i 为能独立变化因素的个数。

$$S_T = \sum_{i=1}^n (\eta_i - \bar{\eta})^2 = \sum_{i=1}^n \eta_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n \eta_i \right)^2 \quad (5-7)$$

$$S_T = (6.192^2 + 6.158^2 + \cdots + 6.575^2) - \frac{1}{36} \times 233.118^2 = 221.262$$

$$f_T = n - 1 \quad (5-8)$$

$$f_T = n - 1 = 35$$

各种因素的波动 $S_i (i = 1, 2, \cdots, 7)$ 为:

$$S_i = \frac{T_{1i}^2 + T_{2i}^2 + T_{3i}^2}{r} - \frac{233.118^2}{36} \quad \left(r = \frac{n}{\text{水平数}} = \frac{36}{3} = 12 \right)$$

可控因素 A 的波动 S_1 为:

$$\begin{aligned} S_1 = S_A &= \frac{T_{11}^2 + T_{21}^2 + T_{31}^2}{12} - \frac{233.118^2}{36} \\ &= \frac{75.381^2 + 77.834^2 + 79.903^2}{12} - 1509.554 = 0.854 \end{aligned}$$

$$f_1 = f_A = 3 - 1 = 2$$

仿此可算得:

$$S_B = 6.7934, f_B = 2, S_C = 0.6973, f_C = 2, S_D = 4.2234, f_D = 2, S_E = 2.1646, f_E = 2, S_I = 0.04697, f_I = 2, S_G = 1.2521, f_G = 2$$

最后, 用分解公式计算误差波动平方和 S_e 及自由度 f_e 。 S_e 为由误差引起的波动平方和, 其值为总波动的平方和减去各因素不同水平所引起的波动平方和, 其自由度 f_e 为误差项自由度。

$$\begin{aligned} S_e &= S_T - (S_A + S_B + S_C + S_D + S_E + S_I + S_G) \\ &= 21.262 - (0.854 + 6.793 + \cdots + 1.252) = 5.230 \end{aligned}$$

$$f_e = 35 - 2 \times 7 = 21$$

然后, 将上述结果整理为方差分析表 (表 5-9)。其中 V_i 为平均平方或方差, F_i 为 i 因素的 F 检验值, 当 F 值大于 $F_{\alpha}^{F_i}(0.01)$ 时, 称 i 因素高度显著, 标示 “***”; 当 F 值大于 $F_{\alpha}^{F_i}(0.05)$ 时, 称 i 因素显著, 标示 “*”。否则因素 i 影响不显著。

从表 5-9 方差分析表可以看出因素 B 和 D 高度显著, 因素 E 显著, 因素 A 、 C 、 I 、 G 不显著。

表 5-9 参数设计内表的方差分析 $F_{27}^2(0.05) = 3.35$, $F_{27}^2(0.01) = 5.4$

来源	S	f	V	F
A	0.853 9	2 Δ	0.427 0	13.43 **
B	6.793 4	2	3.396 7	
C	0.697 3	2 Δ	0.348 7	
D	4.223 4	2	2.111 7	8.35 **
E	2.164 6	2	1.082 3	
I	0.047 0	2 Δ	0.023 5	4.28 *
G	1.252 1	2	0.626 05	
e	5.230 51	21 Δ	0.249 1	2.475
(\bar{e})	6.828 7	(27)	(0.252 9)	
T	21.262	35		

注: 标有符号“ Δ ”的项加以合并。

(8) 确定最佳参数组合。参数组合的确定可以采取两种方法: 第一种是“观察”法, 即由内表中的信噪比列中, η 最大所对应条件为最佳组合; 第二种是“计算”法, 即由第七步的方差分析, 得到最佳组合。此时, 不显著因素的水平可自由选取。

由“观察”法得到的参数组合为: $A_2B_2C_3D_1E_2I_3G_1$, 对应的信噪比为 $\eta_{\max} = 9.134\text{dB}$, 即第八号方案。

由“计算”法求最佳参数组合可采用下面的两段法:

1) 由 η 求 (稳健性) 参数组合。因为 η 越大输出特性越稳定, 所以此时选择的参数组合具有质量波动小、抵抗三种干扰能力强的特性, 即具有稳健性。

本例中, 由于 A 、 C 、 I 、 G 因素不显著, 所以其水平可自由选取; 显著因素和高度显著因素 B 、 D 和 E 的水平必须由 η 来选取:

$$B_1(\bar{\eta} = 7.086\text{dB}), D_1(\bar{\eta} = 6.956\text{dB}), E_2(\bar{\eta} = 6.705\text{dB})$$

得到满足稳健性的一组参数 $AB_1CD_1E_2IG$ 。

如果取不显著因素的水平为 $A_2C_2I_3G_3$, 那么相应的无量纲驱动力为:

$$F = \frac{\pi}{2} \left(\frac{BCD^2}{A} + EIGHJ \right) = \frac{\pi}{2} \times \left(\frac{10 \times 3 \times 4^2}{650} + 0.7 \times 0.67 \times 1.74 \times 1.5 \times 1.16 \right) = 4.24$$

2) 再由不显著因素求 (一致性) 参数组合。由于满足稳健性的参数组合对应的输出特性 (4.24) 与目标值 (4.5) 相差太大 (偏移过多), 因此必须进行目标校正。通过调整对 η 影响不显著、但与 F 成线性关系的因素的参数值, 使输出特性接近目标值。

但在本例中, 根据专业知识, 驱动力 F 与因素 G 成线性关系, 且对信噪比影响不大, 因此, 因素 G 可作为调整因素。其调整值为:

$$G = \frac{\frac{2}{\pi} \times 4.5 - 10 \times 3 \times 4^2 / 650}{0.7 \times 0.67 \times 1.5 \times 1.16} = 2.59$$

得到满足“稳健性”和“一致性”的参数组合, 即最佳条件为:

$$A = 650, B = 10, C = 3, D = 4, E = 0.7, G = 2.59, I = 0.67.$$

在一般情况下, 要进行灵敏度分析, 应找一个对信噪比影响不大而对灵敏度影响显著的因素作为调整因素, 用来校正输出特征与目标值的偏差。

3. 不可计算场合参数设计

不可计算场合参数设计是指输出目标值与所选参数之间不能建立数学表达式时所进行的参数设计。

例 5-2 根据产品发展规划,需研制一种飞行器。在研制任务书中,规定这种飞行器的作用半径为 26 ± 2 (无量纲量)。工程技术人员已设计了飞行器试样,并进行了试验,发现作用半径达不到技术要求,拟采用综合误差因素法进行参数设计。

解 用半径这一质量特性作为望目特性,目标值 $m = 26$, 容差 $\Delta = 2$ 。

(1) 确定可控因素及其水平。据以往的设计经验和专业知识可知,在影响飞行器作用半径的可控因素中,三个主要的因素是 ω 、 α 和 n 。

可控因素的水平确定为三个:第二水平为系统设计阶段初步确定的参数值;第一、第三水平分别采取等差数列,具体取值见可控因素水平表(表 5-10)。

表 5-10 可控因素水平表

因素 \ 水平	第一水平	第二水平	第三水平
ω	1.1	1.2	1.3
α	0.18	0.20	0.22
n	600	750	900

(2) 内设计。选用正交表 $L_9(3^4)$ 进行内设计。正交表及其具体方案如表 5-11 所示。

表 5-11 正交试验用内表

因素 \ No.	正交表				具体方案		
	ω	α	n	e	ω	α	n
1	1	1	1	1	1.1	0.18	600
2	1	2	2	2	1.1	0.20	750
3	1	3	3	3	1.1	0.22	900
4	2	1	2	3	1.2	0.18	750
5	2	2	3	1	1.2	0.20	900
6	2	3	1	2	1.2	0.22	600
7	3	1	3	2	1.3	0.18	900
8	3	2	1	3	1.3	0.20	600
9	3	3	2	1	1.3	0.22	750

(3) 确定误差因素及其水平。在飞行器设计中,由于试验很困难,我们只考虑生产过程对可控因素的影响,故误差因素只取三个: ω' 、 α' 和 n' 。

误差因素的水平主要根据工厂的生产能力和设备情况而定。 ω' 、 α' 和 n' 的波动均按 10% 考虑(表 5-12)。

表 5-12 误差因素水平表

因素 \ 水平	ω'	α'	n'
第一水平	$\omega_0 - 0.1\omega_0$	$\alpha_0 - 0.1\alpha_0$	$n_0 - 0.1n_0$
第二水平	ω_0	α_0	n_0
第三水平	$\omega_0 + 0.1\omega_0$	$\alpha_0 + 0.1\alpha_0$	$n_0 + 0.1n_0$

注:表中 ω_0 、 α_0 和 n_0 的数值采用内表中给出的参数值。

(4) 外设计。为了减少试验次数,我们把所有误差因素综合为一个“综合误差因素

N'' ，考查综合误差因素的三个水平。这种外设计称为综合误差因素法。下面以表 5-12 为例，讨论如何综合的问题。

N'_1 ：负侧最坏条件，即使得输出特性取最小值的误差因素水平组合。在可计算的场合，由输出特性计算公式可找到这种条件；在不可计算的场合，则由经验或其他方法估计这种条件。

N'_2 ：标准条件，即各误差因素均取第二水平的组合。

N'_3 ：正侧最坏条件，即使得输出特性取最大值的误差因素水平组合。

以综合误差因素 N' 的三个水平 N'_1 、 N'_2 和 N'_3 代替外表 L9 (3^4)，可使试验次数比原来减少 2/3，倘若不考虑 N'_2 ，那么试验次数还可进一步减少。

在本例中，综合误差因素选取两个水平，即负侧最坏条件 N'_1 和正侧最坏条件 N'_3 。即：

N'_1 —— $\omega'_1, \alpha'_1, n'_1$ ； N'_3 —— $\omega'_3, \alpha'_3, n'_3$

试验方案数为 9 次 $\times 2 = 18$ 次。

(5) 求输出特性。把综合误差因素代入内表，并按规定作试验，求出作用半径（表 5-13）。

(6) 计算信噪比 η 。以方案一为例，根据式 (5-2)、式 (5-6)，计算过程如下：

$$S_m = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2 = \frac{1}{2} \times (23 + 26)^2 = 1200.5$$

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

$$= \frac{1}{2-1} \times [(23^2 + 26^2) - 1200.5] = 4.5$$

$$\eta = 10 \lg \frac{(S_m - V_e)/n}{V_e} = 10 \lg \frac{\frac{1}{2} \times (1200.5 - 4.5)}{4.5} = 21.24$$

仿此，可求得其余方案的信噪比（表 5-13）。

(7) 内表的统计分析。在作方差统计分析之前，根据式 (5-7) 和式 (5-8)，首先对内表作简单计算（表 5-14），即：

$$S_r = \sum_{i=1}^n (\eta_i - \bar{\eta})^2 = \sum_{i=1}^n \eta_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n \eta_i \right)^2$$

$$= (24.25^2 + 23.10^2 + \cdots + 26.56^2) - 5416.47 = 192.96$$

表 5-13 输出特性表

No.	$\omega \quad \alpha \quad n \quad e$				N'_1			N'_3			y		η/dB
	1	2	3	4	ω'	α'	n'	ω'	α'	n'	y_1	y_3	
1	1	1	1	1	0.99	0.162	540	1.21	0.198	660	23	26	21.23
2	1	2	2	2	0.99	0.180	675	1.21	0.220	825	25	23	24.59
3	1	3	3	3	0.99	0.198	810	1.21	0.240	990	28	31	22.85
4	2	1	2	3	1.08	0.162	810	1.32	0.198	825	25	26	31.14
5	2	2	3	1	1.08	0.180	540	1.32	0.220	990	24	26	24.94
6	2	3	1	2	1.08	0.198	675	1.32	0.240	660	26	27	31.47

(续)

No.	$\omega \quad \alpha \quad n \quad e$				N'_1			N'_3			y		η/dB
	1	2	3	4	ω'	α'	n'	ω'	α'	n'	y_1	y_3	
7	3	1	3	2	1.17	0.162	675	1.43	0.198	990	28	30	26.23
8	3	2	1	3	1.17	0.180	810	1.43	0.220	660	25	30	17.78
9	3	3	2	1	1.17	0.198	540	1.43	0.240	825	27	28	31.80

$$f_r = n - 1 = 9 - 1 = 8$$

$$S_w = \frac{72.90^2 + 76.93^2 + 70.96^2}{3} - 5416.47 = 5425.57 - 5416.47 = 9.1$$

$$f_w = 3 - 1 = 2$$

仿此可求出:

$$S_\alpha = 39.78, f_\alpha = 2; S_n = 56.09, f_n = 2; S_e = 3.03, f_e = 2$$

表 5-14 内表的统计分析

$$S_\alpha = 39.78, f_\alpha = 2; S_n = 56.09, f_n = 2; S_e = 3.03, f_e = 2$$

No.	ω	α	n	e	η/dB
	1	2	3	4	
1	1	1	1	1	21.23
2	1	2	2	2	24.59
3	1	3	3	3	22.85
4	2	1	2	3	31.14
5	2	2	3	1	24.94
6	2	3	1	2	31.47
7	3	1	3	2	26.23
8	3	2	1	3	17.78
9	3	3	2	1	31.80
T_1	68.67	78.60	70.48		$T = 220.79$
T_2	87.55	67.31	87.53		$CT = 5416.47$
T_3	75.81	86.12	74.02		
S	60.59	59.76	53.97	3.03	$S_T = 192.96$

由内表可直接看出最大信噪比对应的方案为第六号方案, 即 $\omega_2\alpha_{n2}1$, $\eta_{\max} = 31.47\text{dB}$ 。

下面对内表作方差分析 (表 5-15)。由方差分析表知, n 是显著因素, ω 和 α 不显著。最佳方案与直接观察一致。

表 5-15 方差分析表 $F_2^2 (0.05) = 19$

来源	S	f	V	F
ω	60.59	2	4.05	2.66
α	59.76	2	19.89	13.09
n	53.97	2	28.05	18.45*
e	3.03	2	1.52	
T	192.96	8		

(8) 显著因素效应图。显著因素 n 的效应图如图 5-17 所示。至此完成参数设计, 得到作用半径满足输出要求的最佳组合方案: $\omega_2 = 1.2$, $\alpha_3 = 0.22$, $n_1 = 600$, $\eta = 31.47\text{dB}$ 。

三、望小特性参数设计

望小特性就是希望输出特性越小越好, 波动越小越好, 且不取负值的计量值特性。例如, 机加轴、孔的同轴度或机加零件的平行度、垂直度等形状位置偏差、测量误差、磨损量、杂质或有害成分含量等, 均属望小特性。望小特性也可以看作是目标值为零的望目特性。

1. 望小特性的信噪比

望小特性参数设计的目的是找到输出特性接近于零, 稳定性最好的参数组合。当输出特性 y 服从正态分布 $N(\mu, \sigma^2)$ 时, 既希望 μ 越小越好, 又希望 σ^2 越小越好。因此, 定义望小特性的信噪比为:

$$\eta = \frac{1}{\mu^2 + \sigma^2} \quad (5-9)$$

η 越大, 产品的输出特性就越小, 其表现就越稳定。

设 y_1, y_2, \dots, y_n 为望小特性 y 的 n 个观测值。由

$$\hat{\mu}^2 = \bar{y}^2 - \frac{\sigma^2}{n} = \bar{y}^2 - \frac{V_e}{n}$$

$$\begin{aligned} \text{可知: } \hat{\mu}^2 + \hat{\sigma}^2 &= \bar{y}^2 - \frac{V_e}{n} + V_e = \bar{y}^2 + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \\ &= \frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^n y_i^2 - n\bar{y}^2 + n\bar{y}^2 \right] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \end{aligned} \quad (5-10)$$

式 (5-10) 为 $\mu^2 + \sigma^2$ 的无偏估计, 于是可取:

$$\hat{\eta} = n / \sum_{i=1}^n y_i^2 \quad (5-11)$$

将 $\hat{\eta}$ 取常用对数再扩大 10 倍化为分贝值 (dB), 并仍以 η 记之, 则有:

$$\eta = -10 \lg \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 (\text{dB}) \quad (5-12)$$

上式即为衡量望小特性稳定性的信噪比计算公式。

2. 望小特性的参数设计方法

下面以一个具体例子说明望小特性的参数设计方法。

例 5-3 设计一种新型液压泵, 使阀头部位摩擦副的磨损尽可能小。以磨损量 y 作为产品的输出特性, y 为望小特性。

(1) 确定可控因素的水平表。选取的可控因素有: 摩擦副材料 A 、负载 B 、表面粗糙度 C 、配合间隙 D 、摩擦副壳体材料 E 。各因素均取两个水平。同时还要考察 $A \times B$ 、 $A \times C$ 的交互作用。因素水平表如表 5-16 所示。

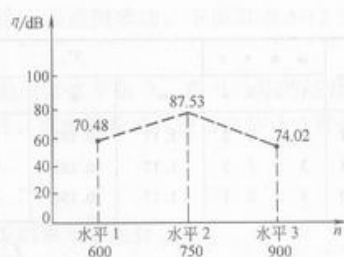


图 5-17 因素 n 对作用半径的效应图

因素	水平
第一水平	
第二水平	

(2) 内设计

例造成摩擦副磨损表现在各重要部位副八个部位 R_1, I 上八个部位的磨损

因素	A
列号	1
No.	
1	1
2	1
3	1
4	1
5	2
6	2
7	2
8	2
现行产品	
T_1	6.2
T_2	-1.1

(3) 计算

各号试验设计的变换。

(4) 对内

S_7

S_A

表 5-16 可控因素水平表

因素	摩擦副材料	负载	表面粗糙度	配合间隙	摩擦副壳体材料
第一水平	A_1	B_1	C_1	D_1	E_1
第二水平	A_2	B_2	C_2	D_2	E_2

(2) 内设计。选用 $L8(2^7)$ 作为内表, 安排可控因素。其表头设计如表 5-17 所示。本例造成摩擦副磨损量波动的误差因素是摩擦副的部位不同, 其磨损量也不同。质量的稳定性表现在各重要部位的磨损程度都小, 而且磨损程度均匀。因而对内表各号试验方案测量摩擦副八个部位 R_1, R_2, \dots, R_8 的磨损量数据。为了与现行产品比较, 同样测量了现行产品以上八个部位的磨损量数据 (表 5-17)。

表 5-17 内表及磨损试验数据

因素 列号 No.	A	B	A×B	C	A×C	D	E	磨损量/ μm								η dB	η' $=\eta+20$
	1	2	3	4	5	6	7	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	-1.9
2	1	1	1	2	2	2	2	6	10	3	5	3	4	20	18	-20.6	-0.6
3	1	2	2	1	1	2	2	9	10	5	4	2	1	3	2	-14.8	5.2
4	1	2	2	2	1	1	1	8	8	5	4	3	4	9	9	-16.5	3.5
5	2	1	2	1	2	1	2	10	14	8	8	3	2	20	33	-24.2	-4.2
6	2	1	2	2	1	2	1	18	26	4	2	3	3	7	10	-21.7	-1.7
7	2	2	1	1	1	2	1	14	22	7	5	3	4	19	21	-23.0	-3.0
8	2	2	1	2	1	1	2	16	13	5	4	11	4	14	30	-23.3	-3.3
现行产品								17	22	7	12	10	8	18	25	-24.1	-4.1
T_1	6.2 - 8.4 - 8.8 - 3.9 - 1.7 - 5.9 - 3.1																
T_2	-12.2 2.4 2.8 -2.1 -4.3 -0.1 -2.9															$T = -6$	

(3) 计算信噪比。根据式 (5-12) 计算信噪比, 如 No. 1 方案的 η 为:

$$-10 \lg \frac{1}{8} (12^2 + 12^2 + 10^2 + \dots + 20^2) \text{ dB} = -21.9 \text{ dB}$$

各号试验计算的结果记入表 5-17 中。为计算、分析简便, 将所有数据进行 $\eta' = \eta + 20$ 的变换。

(4) 对内表进行方差分析。首先计算总波动平方和、各因素波动平方和及自由度。

$$CT = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n \eta'_i \right)^2 = \frac{(-6)^2}{8} = 0.75$$

$$S_T = (-1.9)^2 + (-0.6)^2 + \dots + (-3.3)^2 - CT = 79.18 \quad (f_T = 7)$$

$$S_A = S_1 = \frac{1}{8} (T_1 - T_2)^2 = \frac{1}{8} [6.2 - (-12.2)]^2 = 42.32 \quad (f_A = 1)$$

$$S_B = S_2 = \frac{1}{8} [-8.4 - 2.4]^2 = 14.58 \quad (f_B = 1)$$

$$S_{A \times B} = S_3 = \frac{1}{8} [-8.8 - 2.8]^2 = 16.82 \quad (f_{A \times B} = 1)$$

$$S_c = S_4 = \frac{1}{8}[-3.9 - (-2.1)]^2 = 0.4 \quad (f_c = 1)$$

$$S_{A \times C} = S_5 = \frac{1}{8}[-1.7 - (-4.3)]^2 = 0.84 \quad (f_{A \times C} = 1)$$

$$S_D = S_6 = \frac{1}{8}[-5.9 - (-0.1)]^2 = 4.21 \quad (f_D = 1)$$

$$S_E = S_7 = \frac{1}{8}[-3.1 - (-2.9)]^2 = 0.01 \quad (f_E = 1)$$

然后进行方差分析,并计算各因素的纯波动和贡献率(表 5-18)。其中,纯波动 S'_A, S'_B, \dots, S'_D 为 $S_i - V_e$, $S'_i = S_e + nV_e$ (n 为 S_A, S_B, \dots, S_D 个数)。贡献率为因素 i 取不同水平时的波动对于总波动所占比例, $\rho_i = \frac{S'_i}{S_T} \times 100\%$ 。

表 5-18 方差分析表

$$F_8^1(0.05) = 10.1, F_8^1(0.01) = 34.1$$

方差来源	波动平方和 S	自由度 f	方差 V	方差比 F	纯波动平方和 S'	贡献率 ρ (%)
A	42.32	1	42.32	100.8**	41.76	52.9
B	14.58	1	14.58	34.7**	14.16	17.9
$A \times B$	16.82	1	16.82	40.0**	16.14	20.7
C	0.40	1△	—	—	—	—
$A \times C$	0.84	1	—	—	—	—
D	4.21	1	4.21	10.0*	3.78	4.8
E	0.01	1△	—	—	—	—
(\bar{e})	(1.25)	(3)	(0.42)	—	(2.94)	(3.4)
T	79.18	7	—	—	79.18	100

注:标有符号“△”的项加以合并。

在方差分析中,将方差小于 1 的项并为 \bar{S}_e 。经方差分析得出,因素 A, B, D 及交互作用 $A \times B$ 均为显著因素。

(5) 确定最佳参数组合并进行工程平均估计。由于 $A, B, A \times B$ 均为显著因素,因此作二元配置表(表 5-19),选取 A, B 的最佳参数组合。由二元配置表可以看出, $A_1 B_2$ 为因素 A, B 的最优水平搭配。

表 5-19 A, B 二元配置表

$B \backslash A$	A	
	A_1	A_2
B_1	$\frac{-1.9+0.6}{2} = -1.25$	$\frac{-4.2-1.7}{2} = -2.95$
B_2	$\frac{5.2+3.5}{2} = 4.35$	$\frac{-3.0-3.3}{2} = -3.15$

由表 5-17 知, D 的最优水平为 D_2 。最后得到最佳参数组合为 $A_1 B_2 C_0 D_2 E_0$ 。

在最佳参数组合条件下信噪比的工程平均估计计算如下:

$$\begin{aligned} \hat{\eta}_{A_1 B_2 C_0 D_2 E_0} &= \bar{T} + (\bar{A}_1 - \bar{T}) + (\bar{B}_2 - \bar{T}) + (\bar{A}_1 B_2 - \bar{A}_1 - \bar{B}_2 + \bar{T}) + (\bar{D}_2 - \bar{T}) - 20 \\ &= 4.35 \text{dB} - 0.02 \text{dB} - (-0.75) \text{dB} - 20 \text{dB} = -14.92 \text{dB} \end{aligned}$$

(6) 最佳参数组合的质量水平及收益。现制品条件下的信噪比数值为 -24.10dB , 改进

设计后, 信

至此, 5

望小

由望小

望大特

如, 产品的

们的最大值

1/y 就是望小

由望小

当以分

式 (5-1

例 5-3 同。

容差设计

关参数的容差

计者的经验

联系起来, 因

响和经济性,

大容差, 使

一、质

产品质量

质量特性偏离

的程度成正比

造时达不到 1

设计后, 信噪比增益为 $-14.92\text{dB} - (-24.10)\text{dB} = 9.18\text{dB}$, 其真数增益为:

$$\hat{\eta}_{\text{现}} - \hat{\eta}_{\text{佳}} = -10\lg \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_{i\text{现}}^2}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_{i\text{佳}}^2} = -10\lg \frac{\hat{\sigma}_{\text{现}}^2}{\hat{\sigma}_{\text{佳}}^2} = -9.18$$

$$\frac{\hat{\sigma}_{\text{现}}^2}{\hat{\sigma}_{\text{佳}}^2} = 10^{9.18/10} = 8.28$$

即在最佳参数组合的条件下, 磨损量的波动均方值将比现制品缩小 8.28 倍。

至此, 完成了本例望小特性的参数设计。

四、望大特性的参数设计

望大特性就是希望输出特性越大越好, 波动越小越好, 且不取负值的计量值特性。例如, 产品的强度、寿命都是望大特性。但是回收率、合格率、效率却不是望大特性, 因为它们的最大值是 100%。望大特性也可以看作目标值为 ∞ 的望目特性, 所以望大特性 y 的倒数 $1/y$ 就是望小特性。因此, 可以通过倒数变换, 把望大特性转换为望小特性来处理。

由望小特性的信噪比公式 (5-11)、公式 (5-12) 可知, 望大特性的信噪比公式应为:

$$\hat{\eta} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2}} \quad (5-13)$$

当以分贝为单位时, 有:

$$\eta = -10\lg \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} (\text{dB}) \quad (5-14)$$

式 (5-14) 即为衡量望大特性稳定性的信噪比计算公式。参数设计的试验与计算步骤与例 5-3 同。

第四节 容差设计

容差设计 (即公差设计) 是在确定各零部件参数后, 经济、合理地安排和决定系统有关参数的容差 (公差)。传统的容差设计方法是查阅相关设计手册, 根据零部件的用途和设计者的经验确定它们的容差, 并没有考虑内、外干扰因素, 而且没有把容差的确定与经济性联系起来, 因此确定的容差常常不尽合理。容差设计应考虑内、外干扰因素对质量波动的影响和经济性, 对质量波动影响大的零部件制定严格容差, 对质量波动影响小的零部件制定较大容差, 使容差确定更加合理, 零部件成本低, 装配成的产品性能稳定。

一、质量损失函数

产品质量的波动是客观存在的, 有质量波动就会造成社会损失。也就是说, 只要产品的质量特性偏离预定的目标值, 就会给客户或者社会造成损失, 而且这种损失大小与“波动”的程度成正比。例如, 灯泡的真空度目标值是 100%, 此时的使用寿命为无限长, 但工厂制造时达不到 100% 的真空度, 例如 99% 即算合格。顾客买到 99% 真空度的灯泡, 虽能使用,

但使用寿命缩短,给客户和社会造成了损失。为了对质量作出定量评价,可以采用质量损失函数的概念。所谓质量损失函数,就是定量表述“经济损失”与“功能波动”之间相互关系的函数。在本章第一节中,我们只简单地讨论了质量损失函数的一般形式,事实上,按照产品质量特性的不同,存在着不同形式的质量损失函数。

1. 望目特性的质量损失函数

设产品(系统)的输出特性(质量特性)为 y ,目标值为 m 。若 $y \neq m$,即 $|y-m| \neq 0$,则造成经济损失,且偏差越大,损失也越大。当 $y=m$ 时,损失最小(零损失)。输出特性为 y 的产品,其质量损失记作 $L(y)$ 。将函数 $L(y)$ 在目标值 m 周围用泰勒公式展开,得到:

$$L(y) = L(m) + \frac{L'(m)}{1!}(y-m) + \frac{L''(m)}{2!}(y-m)^2 + \cdots + \frac{L^{(n-1)}(m)}{(n-1)!}(y-m)^{(n-1)} + \cdots \quad (5-15)$$

因为,当 $y=m$ 时, $L(y)=0$,即 $L(m)=0$;又因当 $y=m$ 时, $L(y)$ 存在最小值,所以 $L'(m)=0$;再略去二阶以上高阶项,则式(5-15)可简化为:

$$L(y) = \frac{L''(m)}{2!}(y-m)^2 \quad (5-16)$$

由于常数项 $L''(m)/2!$ 与质量特性 y 无关,令 $k=L''(m)/2!$,把它代入式(5-16),得到:

$$L(y) = k(y-m)^2 \quad (5-17)$$

式(5-17)即为望目特性的质量损失函数。

在质量损失函数中, $(y-m)^2$ 反映了质量特性与目标值的接近程度,亦即质量波动程度;比例常数 k 反映了单位平方偏差的经济损失, k 值越大,损失越大。图5-18为不同比例常数 k 时质量损失函数的变化曲线,它们是以 m 为中心的一簇抛物线。

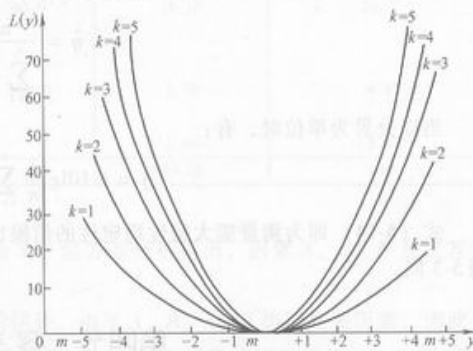


图 5-18 $L(y)$ 曲线图

原则上讲,只要知道抛物线 $L(y)$ 上的一个点,便可求得比例常数 k 。下面分两种情况来介绍 k 值的确定方法。

(1) 根据功能界限 Δ_0 和相应的损失 A_0 求 k 。所谓功能界限 Δ_0 ,是指产品能够正常发挥其功能的界限值。若产品的输出特性为 y ,目标值为 m ,则当 $|y-m| \leq \Delta_0$ 时,产品可正常发挥功能;而当 $|y-m| > \Delta_0$ 时,产品将丧失功能,且造成的经济损失为 A_0 。由式(5-17)得到:

$$A_0 = k\Delta_0^2$$

或

$$k = A_0/\Delta_0^2$$

(2) 根据容差 Δ 和相应的损失 A 求 k 。所谓容差 Δ ,是指容许的偏差或判断产品合格与否的界限。当 $|y-m| \leq \Delta$ 时,产品为合格品;而当 $|y-m| > \Delta$ 时,产品为不合格品,

相应的损失为 A ,由

上述情况是功

2. 望小特性的

望小特性是不即质量特性 y 越接目特性,可求出望

设 y 是望小特泰勒展开式:

舍去二阶以上高阶

设技术文件 A ,把 Δ 、 A 代入

由此得到望

望小特性质

对于 n 件产

\cdots, y_n , 则平均

式中, $V_T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n$

3. 望大特性

望大特性是零(即 $L'(\infty)$)

设技术文

$(1/\Delta^2)$, 即 $k =$

相应的损失为 A ，由式 (5-17) 得到 $A = k\Delta^2$ ，故有：

$$k = \frac{A}{\Delta^2} \quad (5-18)$$

上述情况是功能界限或公差对称条件下比例常数 k 的求法，相应的平均质量损失为：

$$\bar{L}(y) = \begin{cases} \frac{A_0}{\Delta_0^2} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - m)^2 \\ \frac{A}{\Delta^2} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - m)^2 \end{cases}$$

2. 望小特性的质量损失函数

望小特性是不取负值，希望越小越好的一种质量特性。望小特性理想的取值是“零”，即质量特性 y 越接近零值，产品质量就越高。它相当于目标值为“0”的望目特性。仿照望目特性，可求出望小特性的质量损失函数。

设 y 是望小特性，当 $y=0$ 时，质量损失最小且为零，即 $L(0)=0$ ， $L'(0)=0$ ，由泰勒展开式：

$$L(y) = L(0) + \frac{L'(0)}{1!}y + \frac{L''(0)}{2!}y^2 + \dots \quad (5-19)$$

舍去二阶以上高阶项，令 $L''(0)/2! = k$ ，得到：

$$L(y) = ky^2 \quad (5-20)$$

设技术文件规定的公差为 Δ ，不合格时的损失为 A ，把 Δ 、 A 代入式 (5-20) 得：

$$k = \frac{A}{\Delta^2} \quad (5-21)$$

由此得到望小特性的质量损失函数为：

$$L(y) = \frac{A}{\Delta^2} y^2$$

望小特性质量损失函数的图形如图 5-19 所示。

对于 n 件产品，设其输出特性分别取值 y_1, y_2, \dots, y_n ，则平均质量损失为：

$$\bar{L}(y) = \frac{A}{\Delta^2} V_T \quad (5-22)$$

式中， $V_T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 = \frac{1}{n} (y_1^2 + y_2^2 + \dots + y_n^2)$

3. 望大特性质量损失函数

望大特性是不取负值，希望越大越好的质量特性。设 y 为望大特性，在 $y \rightarrow \infty$ 处损失为零（即 $L'(\infty)=0$ ， $L(\infty)=0$ ）。按照 $y \rightarrow \infty$ 的泰勒展开式，仿前得到：

$$L(y) = L(\infty) + \frac{L'(\infty)}{1!} \frac{1}{y} + \frac{L''(\infty)}{2!} \frac{1}{y^2} + \dots = k \frac{1}{y^2}$$

设技术文件规定的公差为 Δ ，不合格时的损失为 A ，分别把 Δ 和 A 代入上式得到 $A = k(1/\Delta^2)$ ，即 $k = A\Delta^2$ ，把 k 值代入公式，便得到单件产品条件下望大特性的质量损失函数为：

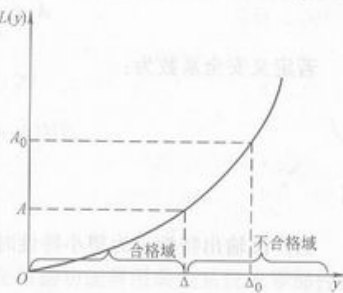


图 5-19 望小特性损失函数

$$L = \frac{A\Delta^2}{y^2} \quad (5-23)$$

对于 n 件产品, 设其输出特性分别取值为 y_1, y_2, \dots, y_n , 相应的平均质量损失计算式为:

$$\bar{L}(y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{A\Delta^2}{y_i^2} = \frac{1}{n} A\Delta^2 \left(\frac{1}{y_1^2} + \frac{1}{y_2^2} + \dots + \frac{1}{y_n^2} \right) \quad (5-24)$$

望大特性质量损失函数的图形如图 5-20 所示。

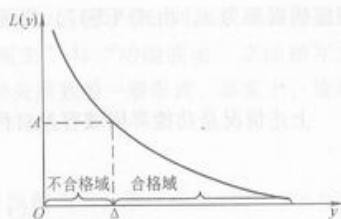


图 5-20 望大特性损失函数

二、容差的确定

1. 望目特性和望小特性容差的确定

设产品的输出特性 y 为望目特性, 容差为 Δ , 当产品不合格时, 工厂要进行返修或作报废处理, 造成的损失为 A , 产品的功能界限为 Δ_0 , 丧失功能时的损失为 A_0 , 那么质量损失函数为:

$$L(y) = \frac{A_0}{\Delta_0^2} (y - m)^2 \quad (5-25)$$

当 $|y - m| = \Delta$ 时, $L(y) = A$, 代入上式得:

$$A = \frac{A_0}{\Delta_0^2} \Delta^2 \quad \text{或} \quad \Delta = \sqrt{\frac{A}{A_0}} \Delta_0 \quad (5-26)$$

若定义安全系数为:

$$\Phi = \sqrt{\frac{A_0}{A}} \quad (5-27)$$

则

$$\Delta = \frac{\Delta_0}{\Phi} \quad (5-28)$$

当产品输出特性 y 为望小特性时, 其质量损失函数为:

$$L(y) = \frac{A_0}{\Delta_0^2} y^2$$

若已知不合格损失为 A , 即 $y = \Delta$ 时, $L(y) = A$, 则:

$$A = \frac{A_0}{\Delta_0^2} \Delta^2 \quad \text{或} \quad \Delta = \sqrt{\frac{A}{A_0}} \Delta_0 = \frac{\Delta_0}{\Phi}$$

与望目特性的公式相同。

例 5-4 煤气灶用压电晶体点火器的主要性能指标是瞬态电压, 其目标值为 13kV, 功能界限为 $\Delta_0 = 500V$, 丧失功能带来的损失为 5 元。出厂前产品不合格作报废处理的损失为 2.8 元, 求该产品的出厂容差。

解 安全系数为

$$\Phi = \sqrt{\frac{A_0}{A}} = \sqrt{\frac{5}{2.8}} = 1.336$$

容差

$$\Delta = \frac{\Delta_0}{\Phi} = \frac{500V}{1.336} = 374.25V$$

即产品的瞬态电压指标为 $13000V \pm 374V$ 。

例 5-5 某要求越小越好。不合格时工厂解 已知

所以工厂

2. 望大特

望大特性

若已知不

所以

例 5-6

断裂, 此时通聚氯乙型材解 已知

故:

所以,

三、容

容差确

容差。容差零部件的精确, 仅当改是对影响产算损失函数

例 5-7

数 b (温度所示。产品在标准温度

根据式

波动的合计的方差, 设

例 5-5 某挖煤机产品液压操纵阀的关键特性之一是清洁度, 即每片阀含杂质的毫克数要求越小越好。当每片含杂质超过 20mg 时, 产品丧失功能, 需花费 70 元进行修理, 而产品不合格时工厂的返修损失仅为 10 元, 求产品的出厂容差。

解 已知 $\Delta_0 = 20\text{mg}$, $A_0 = 70$ 元, $A = 10$ 元, 则:

$$\Phi = \sqrt{\frac{A_0}{A}} = \sqrt{\frac{70}{10}} = 2.646 \quad \text{和} \quad \Delta = \frac{\Delta_0}{\Phi} = \frac{20\text{mg}}{2.646} = 7.559\text{mg}$$

所以工厂验收的合格标准为 $y \leq 7.559\text{mg}$ 。

2. 望大特性的容差确定

望大特性的质量损失函数为 $L(y) = A_0 \Delta_0^2 \frac{1}{y^2}$

若已知不合格损失为 A , 即 $y = \Delta$ 时, $L(y) = A$, 则 $A = A_0 \Delta_0^2 \frac{1}{\Delta^2}$

$$\text{所以} \quad \Delta = \sqrt{\frac{A_0}{A}} \Delta_0 = \Phi \Delta_0 \quad (5-29)$$

例 5-6 用硬聚氯乙烯型材加工塑料门窗。当塑料的拉伸强度低于 31MPa 时, 门窗就会断裂, 此时造成的损失为 200 元, 而因材料不合格工厂报废处理的损失为 120 元, 试求所用聚氯乙烯型材的容差。

解 已知 $\Delta_0 = 31\text{MPa}$, $A_0 = 200$ 元, $A = 120$ 元, 质量特性 (拉伸强度) 为望大特性, 故:

$$\Phi = \sqrt{\frac{A_0}{A}} = \sqrt{\frac{200}{120}} = 1.29$$

$$\Delta = \Phi \Delta_0 = 1.29 \times 31\text{MPa} \approx 40\text{MPa}$$

所以, 所用型材的强度下限为 40MPa。

三、容差设计的方法

容差确定和容差设计是两个不同的概念。容差确定是根据功能界限确定系统或零部件的容差。容差设计则是质量和成本之间的平衡。在容差设计中, 一方面要考虑提高一个或几个零部件的精度以改进质量, 另一方面又要考虑因提高零部件精度所增加的成本, 两者相权衡, 仅当改进质量所获取的收益大于成本增加的费用时, 才应提高零部件的精度。具体方法是对影响产品输出特性的诸因素进行考察, 通过分析找出关键因素, 逐个改变其精度, 并计算损失函数, 分析、权衡质量收益, 从而确定使产品寿命周期成本最低的零部件的容差。

例 5-7 设计某机械产品, 材料可以从 A_1 、 A_2 、 A_3 三种材料中任选。三种材料的温度系数 b (温度每变化 1°C 的伸长率)、每年的磨损量 β (每年磨损量的百分率) 及价格如表 5-20 所示。产品的功能界限 $\Delta_0 = 6\text{mm}$, 丧失功能时的损失 $A_0 = 180$ 元, $\sigma_{\text{温}} = 15^\circ\text{C}$, $T = 20$ 。产品在标准温度下出厂的尺寸等于目标值 m , 试问选用哪种材料比较合理?

根据式 (5-26), $L(y) = \frac{A_0}{\Delta_0^2} \Delta^2$, 式中 $A_0 = 180$ 元, $\Delta_0 = 6\text{mm}$, Δ^2 是由温度和老化造成

波动的合计方差, 即 $\Delta^2 = \Delta_1^2 + \Delta_2^2$, 其中, Δ_1 为温度波动的方差, $\Delta_1^2 = b^2 \sigma_{\text{温}}^2$; Δ_2 为老化波动的方差, 设 T 为设计寿命, β 为每年的老化量, m 为出厂时的尺寸, 在任意时刻 t , 老化偏

离为 βt , 在 $0 \sim T$ 内, 偏离目标值的平均平方偏差为: $\Delta_2^2 = \frac{1}{T} \int_0^T (m - \beta t - m)^2 dt = \frac{T^2}{3} \beta^2$ 。

表 5-20 材料特性的数据

材 料	b (%)	β (%)	价格/元
A_1	0.08	0.15	1.80
A_2	0.03	0.06	3.50
A_3	0.01	0.05	6.30

将 $\sigma_m = 15^\circ\text{C}$ 和 $T = 20$ 年代入式 (5-26), 分别求得 A_1 、 A_2 、 A_3 三种材料的方差及质量损失为:

$$A_1: \Delta^2 = 0.08^2 \times 15^2 + \frac{20^2}{3} \times 0.15^2 = 4.44$$

$$L(y) = \frac{180 \text{ 元}}{6^2} \times 4.44 = 22.2 \text{ 元}$$

$$A_2: \Delta^2 = 0.03^2 \times 15^2 + \frac{20^2}{3} \times 0.06^2 = 0.6825$$

$$L(y) = \frac{180 \text{ 元}}{6^2} \times 0.6825 \approx 3.41 \text{ 元}$$

$$A_3: \Delta^2 = 0.01^2 \times 15^2 + \frac{20^2}{3} \times 0.05^2 = 0.3558$$

$$L(y) = \frac{180 \text{ 元}}{6^2} \times 0.3558 \approx 1.78 \text{ 元}$$

将上述计算结果整理成表 5-21。

表 5-21 容差设计

材 料	b (%)	β (%)	价格/元	质量损失/元	总损失/元
A_1	0.08	0.15	1.8	22.2	24
A_2	0.03	0.06	3.5	3.41	6.91
A_3	0.01	0.05	6.3	1.78	8.08

表中总损失为价格与质量损失之和, 其最小值为 6.91 元, 故选用材料 A_2 最为合理。

例 5-8 开发一聚合物产品, 其目标特性为聚合度 y , 可通过数学模型计算。首先进行了参数设计, 确定了最佳参数组合, 大大减小了在目标值附近的波动。产品技术指标为 $y = 500 \pm 60$, 当 y 超出此容差时, 整批产品报废, 损失为 10 000 元。为进一步减小质量波动, 降低损失, 须在最佳参数下, 确定工艺条件的容差。

(1) 确定误差因素水平表。各误差因素的波动是由标准偏差来反映的, 表 5-22 给出了误差因素和标准偏差。在容差设计中, 误差因素水平在标称值 m 附近按如下原则确定:

二水平因素: 一水平 $= m - \sigma$, 二水平 $= m + \sigma$ 。

三水平因素: 一水平 $= m - \sqrt{\frac{3}{2}}\sigma = m - 1.22\sigma$, 二水平 $= m$, 三水平 $= m + \sqrt{\frac{3}{2}}\sigma = m + 1.22\sigma$ 。

例如, 因素 A 的标准偏差是 1.25, A 的三水平定为:

$$A_1 = m_A - 1.25$$

误差因素

- A. 聚合温度
- B. 催化剂计量误差
- C. 催化剂进料时间
- D. 单体进料时间

其他因素

因 素

- A. 聚合温度 ($^\circ\text{C}$)
- B. 催化剂计量误差
- C. 催化剂进料时间
- D. 单体进料时间
- E. 溶剂不纯度
- F. 单体计量误差
- G. 单体不纯度

- (2) 正交
- 计算出各种条
- 为简化计
- (3) 方差
- 隔的, 故可以

其次,

No.	
1	1
2	1
3	1
4	1
5	1
6	1

$$A_1 = m_A - 1.22 \times 1.25^\circ\text{C} = m_A - 1.53^\circ\text{C}, A_2 = m_A, A_3 = m_A + 1.53^\circ\text{C}$$

表 5-22 误差因素和标准偏差

误差因素	标准偏差 (σ)	误差因素	标准偏差 (σ)
A. 聚合温度	1.25 $^\circ\text{C}$	E. 溶剂计量误差	5.00%
B. 催化剂计量误差	2.50%	F. 单体计量误差	2.50%
C. 催化剂进料时间	5.00%	G. 单体不纯度	0.50%
D. 单体进料时间	5.00%		

其他因素可以类似地确定, 见表 5-23。

表 5-23 误差因素水平表

因素 \ 水平	第一水平	第二水平	第三水平
A. 聚合温度 ($^\circ\text{C}$)	-1.53	0	+1.53
B. 催化剂计量误差 (%)	-3.06	0	+3.06
C. 催化剂进料时间 (%)	-6.12	0	+6.12
D. 单体进料时间 (%)	-6.12	0	+6.12
E. 溶剂不纯度 (%)	-6.12	0	+6.12
F. 单体计量误差 (%)	-3.16	0	+3.16
G. 单体不纯度 (%)	0.09	0.70	1.31

(2) 正交表的安排与试验。把上述误差因素配置于 $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ 表中, 根据数学模型计算出各种条件下的聚合度 y , 填入表 5-24 中。

为简化计算, 我们将每个条件下的结果减去目标值 500 (表 5-24)。

(3) 方差分析。下面对表 5-24 中的 18 个结果进行方差分析。由于误差因素水平是等间隔的, 故可以用正交多项式进行波动平方和的分解。首先, 列出波动平方和分解公式:

$$\begin{aligned}
 S'_T &= \sum_{i=1}^n (y_i - 500)^2 = S_m + S_T \\
 &= S_m + S_A + S_B + S_C + S_D + S_E + S_F + S_G + S_e \\
 &= S_m + (S_{A1} + S_{A9}) + (S_{B1} + S_{B9}) + (S_{C1} + S_{C9}) + (S_{D1} + S_{D9}) \\
 &\quad + (S_{E1} + S_{E9}) + (S_{F1} + S_{F9}) + (S_{G1} + S_{G9}) + S_e
 \end{aligned}$$

其次, 计算各种波动平方和及自由度。为方便起见, 先列出方差分析辅助表 (表 5-25)。

表 5-24 输出特性试验结果

No.	1	A	B	C	D	E	F	G	结 果	
		2	3	4	5	6	7	8	y	$y - 500$
1	1	1	1	1	1	1	1	1	517	17
2	1	1	2	2	2	2	2	2	516	16
3	1	1	3	3	3	3	3	3	557	57
4	1	2	1	1	2	2	3	3	548	48
5	1	2	2	2	3	3	1	1	464	-36
6	1	2	3	3	1	1	2	2	488	-12

(续)

No.										结 果	
	1	2	3	4	5	6	7	8		\bar{y}	$y - 500$
7	1	3	1	2	1	3	2	3		506	6
8	1	3	2	3	2	1	3	1		476	-24
9	1	3	3	1	3	2	1	2		432	-68
10	2	1	1	3	3	2	2	1		519	19
11	2	1	2	1	1	3	3	2		535	35
12	2	1	3	2	2	1	1	3		534	34
13	2	2	1	2	3	1	3	2		505	5
14	2	2	2	3	1	2	1	3		516	16
15	2	2	3	1	2	3	2	1		475	-25
16	2	3	1	3	2	3	1	2		451	-49
17	2	3	2	1	3	1	2	3		490	-10
18	2	3	3	2	1	2	3	1		471	-29

表 5-25 方差分析辅助表

因素	A	B	C	D	E	F	G
水平							
1	178	46	-3	33	10	-86	-78
2	-4	-3	-4	0	2	-6	-73
3	-174	-43	7	-33	-12	92	151

$$S'_T = \sum_{i=1}^n (y_i - 500)^2 = 17^2 + 16^2 + \cdots + (-29)^2 = 19\,764 \quad (f'_T = 18)$$

$$S_m = n(\bar{y} - m)^2 = 18 \times (500 - 500)^2 = 0 \quad (f_m = 1)$$

$$S_{A1} = \frac{(W_1 T_1 + W_2 T_2 + W_3 T_3)^2}{r \lambda^2 S} = \frac{[(-1) \times 178 + 0 \times (-4) + 1 \times (-174)]^2}{6 \times 2}$$

$$= 10\,325 (f_{A1} = 1)$$

$$S_{Aq} = \frac{(W_1 T_1 + W_2 T_2 + W_3 T_3)^2}{r \lambda^2 S} = \frac{[1 \times 178 + (-2) \times (-4) + 1 \times (-174)]^2}{6 \times 6}$$

$$= 4 (f_{Aq} = 1)$$

其中, W_1 、 W_2 、 W_3 、 λ 、 S 的数值可查有关手册。

仿此可以计算出 S_{B1} 、 S_{Bq} 、 S_{C1} 、 S_{Cq} 、 \cdots 、 S_{G1} 、 S_{Gq} ; 最后由分解公式计算出 S_e , 将这些计算结果整理为方差分析表, 如表 5-26 所示。

(4) 容差设计。缩小误差因素的容差后, 新的误差方差可由下式计算:

$$V_N = V'_T \left\{ \rho_{A1} \left(\frac{\sigma'_A}{\sigma_A} \right)^2 + \rho_{Aq} \left(\frac{\sigma'_A}{\sigma_A} \right)^4 + \rho_{B1} \left(\frac{\sigma'_A}{\sigma_A} \right)^2 + \rho_{Bq} \left(\frac{\sigma'_A}{\sigma_A} \right)^4 + \cdots + \rho_e \right\} \quad (5-30)$$

式中, V_N 为新的波动标准偏差
的波动标准偏差
行波动标准偏差
如果只有 A

来源	
S_m	
$A \begin{Bmatrix} l \\ q \end{Bmatrix}$	
$B \begin{Bmatrix} l \\ q \end{Bmatrix}$	
$C \begin{Bmatrix} l \\ q \end{Bmatrix}$	
$D \begin{Bmatrix} l \\ q \end{Bmatrix}$	
$E \begin{Bmatrix} l \\ q \end{Bmatrix}$	
$F \begin{Bmatrix} l \\ q \end{Bmatrix}$	
$G \begin{Bmatrix} l \\ q \end{Bmatrix}$	
e	
(e)	
T'	

注: 标有符号“ Δ ”

由方差分析表

度控制器来减小由

1.25℃降低到 σ'_A

容差设计就是

需要引进该设备。

首先, 计算安

$V_N = V'_T \left\{ 1 \right.$

其次, 计算安

因 $\Delta_0 = 60$ 时

将现行方差和

因此, 每批收

假定一年生产

(续)

结 果	
y-500	
6	
-24	
-68	
19	
35	
34	
5	
16	
-25	
-49	
-10	
-29	
G	
-78	
-73	
151	

式中, V_N 为新的方差; V_T 为现行方差; ρ_{A_i} 为 A_i 的贡献率; ρ_{A_0} 为 A_0 的贡献率; σ'_A 为 A 的新的波动标准偏差; σ_A 为 A 的现行波动标准偏差; σ'_B 为 B 的新的波动标准偏差; σ_B 为 B 的现行波动标准偏差。

如果只有 A 的容差被缩小, 则新的方差可按式计算:

$$V_N = V_T \left\{ 1 - \rho_{A_i} \left[1 - \left(\frac{\sigma'_A}{\sigma_A} \right)^2 \right] - \rho_{A_0} \left[1 - \left(\frac{\sigma'_A}{\sigma_A} \right)^4 \right] \right\} \quad (5-31)$$

表 5-26 方差分析表

来源	S	f	V	S'	ρ (%)
S_m	0 Δ	1 Δ	0		
$A \begin{Bmatrix} I \\ q \end{Bmatrix}$	10 325	1	10 325	10 246.64	51.84
$B \begin{Bmatrix} I \\ q \end{Bmatrix}$	4 Δ	1 Δ	4		
	660 Δ	1 Δ	660		
$C \begin{Bmatrix} I \\ q \end{Bmatrix}$	2 Δ	1 Δ	2		
	8 Δ	1 Δ	8		
$D \begin{Bmatrix} I \\ q \end{Bmatrix}$	4 Δ	1 Δ	4		
	363 Δ	1 Δ	363		
$E \begin{Bmatrix} I \\ q \end{Bmatrix}$	0 Δ	1 Δ	0		
	40 Δ	1 Δ	40		
$F \begin{Bmatrix} I \\ q \end{Bmatrix}$	1 Δ	1 Δ	1		
	2 640 Δ	1	2 640	2 561.64	12.96
$G \begin{Bmatrix} I \\ q \end{Bmatrix}$	9 Δ	1 Δ	9		
	4 370	1	4 370	4 291.64	21.71
$e \begin{Bmatrix} I \\ q \end{Bmatrix}$	1 332	1	1 332	1 253.6	6.34
	6 Δ	3 Δ	2		
(\bar{e})	(1 097)	(14)	(78.36)		(1.14)
T'	19 764	18	1 098	19 764	100

注: 标有符号 " Δ " 的项加以合并。

由方差分析表可见, A_i 即聚合度对输出特性 y 贡献率最大, 因而应考虑装备一台自动温度控制器来减小由温度而引起的波动。安装温度控制器后聚合温度的波动可由现在的 $\sigma_A = 1.25^\circ\text{C}$ 降低到 $\sigma'_A = 0.25^\circ\text{C}$, 但这一设备需要花费 6 万元。

容差设计就是要权衡安装温度控制器后的收益和由此而引起的成本增加, 从而确定是否需要引进该设备。这就要采用质量损失函数来比较。

首先, 计算安装温度控制器后的新方差, 由于 A_0 不显著, 故只考虑线性部分 A_i 。

$$V_N = V_T \left\{ 1 - \rho_{A_i} \left[1 - \left(\frac{\sigma'_A}{\sigma_A} \right)^2 \right] \right\} = 1 098 \times \left\{ 1 - 0.5184 \times \left[1 - \left(\frac{0.25}{1.25} \right)^2 \right] \right\} = 551.5$$

其次, 计算安装温度控制器前后的质量损失。质量损失函数为:

$$L(y) = kV_T, k = A_0/\Delta_0^2$$

因 $\Delta_0 = 60$ 时, $A_0 = 10 000$ 元, 故 $k = 10 000/60^2 = 2.78$

将现行方差和新方差代入质量损失函数得:

$$L_{\text{原}} = (2.78 \times 1 098) \text{ 元/批} = 3 052.4 \text{ 元/批}$$

$$L_{\text{新}} = (2.78 \times 551.53) \text{ 元/批} = 1 533.3 \text{ 元/批}$$

因此, 每批收益为 $L_{\text{原}} - L_{\text{新}} = 3 052.4 \text{ 元/批} - 1 533.3 \text{ 元/批} = 1 519.1 \text{ 元/批}$

假定一年生产 12 批, 则每年收益为 $1 519.1 \text{ 元/批} \times 12 \text{ 批} = 18229.2 \text{ 元}$

将这些

(5-30)

一台温度控制器投资 60 000 元, 每年折旧费为 8 671 元, 每年净收益为 18 299.2 元 - 8 671 元 = 9 558.2 元, 所以应安装该设备。

第五节 可信性设计

从用户的观点去看质量一般包括六个方面的特性, 即性能、可信性、安全性、适应性、经济性和时间性。在这六个特性中, 可信性具有很重要的意义。本章介绍可信性设计的基本概念, 介绍的重点是产品的可靠性设计。

一、可信性的定义

在国家标准 GB/T 6583—1994 中对可信性 (Dependability) 下的定义为: “描述可用性及其影响因素: 可靠性、维修性和维修保障等性能的一个集合术语。”

可以看出, 可信性代表了产品的可用性, 它包括可靠性、维修性和维修保障性三个因素。

1. 可用性

国家标准 GB/T 3187—1994 对可用性 (Availability) 下的定义为: “在要求的外部资源得到保证的前提下, 产品在规定的条件下和规定的时刻或时间区间内处于可执行规定功能状态的能力。它是产品可靠性、维修性和维修保障性的综合反映。”简言之, 可用性就是产品保持正常运行状态的能力。它不仅与可靠性有关, 而且与产品的维修性能和保持维修手段的能力有关。

2. 可靠性

国家标准 GB/T 3187—1994 中对可靠性 (Reliability) 下的定义为: “产品在规定的条件下和规定的时间区间内完成规定功能的能力。”可靠性与时间和产品的质量密切相关, 如果产品在规定的工作时间内发生故障, 其可靠性就差。

3. 维修性

维修性 (Maintainability) 是指产品在规定的条件下和规定时间内按规定的程序和方法进行维修时, 保持或恢复到规定状态的能力。在故障条件下, 产品的维修性好就意味着可以在较短的时间内, 以最小的花费使产品恢复正常的工作能力。

4. 维修保障性

维修保障性是指维修保障资源能满足产品完好性要求的能力。因此, 维修保障性是从维修资源方面保证维修工作正常进行的能力。

可以看出, 可靠性、维修性和维修保障性是三个相关的概念。从发展过程看, 维修性是从可靠性工程中分离出来的, 而维修保障性又是从维修性工程中分离出来的。从可信性的角度看, 其核心是可靠性工程。因此, 本节介绍的重点是可靠性设计。

二、可靠性设计

1. 可靠性和可靠性工程

可靠性是建立在概率统计理论基础上, 以零件、产品或系统的失效规律为基本研究内容的一门学科。影响产品失效寿命的因素是非常复杂的, 有时甚至是不可捉摸的。因此, 产品的寿命, 即产品的失效时间完全是随机的, 只有依靠长期的、大量的统计与实验才能找到它

的必然规律, 找到支, 包括以下内容用于产品及零件设计和可靠性优化; 除此之外,

2. 可靠性设计

在产品的运行过程中, 这些事件是不是事件的内在规律? 我们从统计学的必然规律的学科关系上。用来描述最典型的是正态

式中, t 为随机

上述数学模型化规律。随机变

$F(t)$ 称为它反映了故障发生的可能性

3. 与可靠

(1) 互补
 $R(t)$, 则有:

上式说明, 之和为 1。因此

一。所谓冗余发生故障, 系庞大或资源浪

(2) 加法故障是多种多样故障出现的概率多大? 如果 A 和 B 为互斥事件用加法定理来

的必然规律,找到能恰当地描述这种规律的数学模型。可靠性工程作为可靠性学科的一个分支,包括以下内容:应用可靠性理论预测与评价产品;零件的可靠性预测或可靠性评价;应用于产品及零件设计中的可靠性设计;综合各方面的因素,考虑设计最佳效果的可靠性分配和可靠性优化;作为以上各分支基础的可靠性实验及其数据处理。

除此之外,为了提高产品的可靠工作能力,还应包括维修性工程和可靠性管理等内容。

2. 可靠性设计的理论基础——概率统计学

在产品的运行过程中,总会发生各种各样的偶然事件(故障)。也就是说,人们不知道这些事件是不是会发生,发生的可能性有多大,何时会发生,在什么条件下发生。这种偶然事件的内在规律很难找到,甚至很难捉摸。但是,偶然事件也并不是完全没规律可循,如果我们从统计学的角度去观察,偶然事件也存在着某种必然规律。概率论就是研究偶然事件中必然规律的学科。这种规律一般反映在随机变量与随机变量发生的可能性(概率)之间的关系上。用来描述这种关系的数学模型很多,如正态模型、指数模型、威布尔模型等,其中最典型的是正态模型。用来描述正态模型的数学关系式为:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2\right]$$

式中, t 为随机变量; μ 为随机变量的平均值; σ 为随机变量的标准差。

上述数学模型称为随机变量 t 的概率密度函数。它表示变量 t 发生概率的密集程度的变化规律。随机变量 t 在某点以前发生的概率可按下式计算:

$$F(t) = \int_{-\infty}^t f(t) dt$$

$F(t)$ 称为随机变量 t 的分布函数,或称为累积分布函数。对于时间型随机变量而言,它反映了故障发生可能的大小,它的值是在 $[0, 1]$ 之间的某个数。其值越小,表示故障发生的可能性就越小。

3. 与可靠性设计有关的几个基本概念

(1) 互补定理。如果某产品出现故障的概率为 $F(t)$,正常运行的概率(可靠度)为 $R(t)$,则有:

$$F(t) + R(t) = 1$$

上式说明,产品或者处于正常运行状态,或者处于故障状态,两者必居其一,故其概率之和为1。因此,在设计时,应尽量减小 $F(t)$ 。采用冗余设计技术是减小 $F(t)$ 的办法之一。所谓冗余设计,相当于将系统的薄弱环节设计成为多环节并联系统,只要有一个环节不发生故障,系统就可正常运行,如图5-21所示。但冗余部分往往“备而不用”,会造成结构庞大或资源浪费。另外,提高安全系数也可以提高可靠性,但并不总是有效。

(2) 加法定理。产品在运行过程中,可能出现的故障是多种多样的。如果A故障出现的概率为 $P(A)$,B故障出现的概率为 $P(B)$,这时产品出现故障的概率为多大?如果A事件发生时,B事件一定不发生,则称A和B为互斥事件。对互斥事件,产品出现故障的概率可用加法定理来计算:

$$P(A \cup B) = P(A) + P(B)$$



图 5-21 冗余设计 (并联系统)

从上式可以看出,当产品的故障源越多时,产品发生故障的概率就越大。这相当于一个串联系统,只要其中一个环节发生故障,系统就不能正常运行,如图 5-22 所示。

因此,在产品设计时,应尽量减少故障源或提高重点薄弱环节的可靠性。减少故障源的办法之一是尽可能减少系统中的零件数量,降低设备的复杂程度。

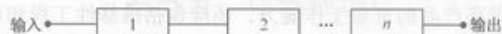


图 5-22 串联系统

当 A 和 B 两事件不互斥时,产品发生故障的概率为:

$$P(A \cup B) = P(A) + P(B) - P(A \cdot B)$$

可见,不互斥事件发生故障的概率比互斥事件要小些。

(3) 乘法定理。产品在运行过程中,可能同时发生几个故障,这种情况发生的概率有多大?当事件 A 的发生不会影响事件 B 的发生时,我们称 A 和 B 两个事件为互相独立的事件。互相独立的事件同时发生的概率为:

$$P(A \cdot B) = P(A) \cdot P(B) = P(A \cap B)$$

由于概率的值总是小于 1,因此,故障同时发生的可能性总是比单独发生的可能性小。

当 A 和 B 两事件不互为独立时,称 A 与 B 为相关事件。在这种情况下,两种事件同时发生的概率为:

$$P(A \cap B) = P(A) \cdot P(B|A)$$

$P(B|A)$ 是在 A 事件发生的条件下, B 事件发生的概率,称为 B 事件的条件概率。条件概率可用下式计算:

$$P(B|A) = \frac{P(A \cap B)}{P(A)}$$

(4) 数学期望。数学期望是随机变量取值的平均数,它是建立在长期、大量统计基础上的平均数。只用几个数值得出的平均数不叫数学期望。数学期望可用下式计算:

$$\mu = E(t) = \int_{-\infty}^{\infty} tf(t) dt$$

(5) 置信度。对产品进行可靠性评价时,通常首先进行抽样,然后对样品进行寿命试验,再以所得的结果来估计母体的失效概率。这样得到的结果总会与母体的真实情况有一定差异,度量这种差异大小的指标叫置信度。在概念上,下面要介绍的可靠度是对产品本身而言的,而置信度则是对试验而言的。

4. 可靠性指标

产品可靠性常用下面的指标来度量:

(1) 可靠度和可靠度函数。产品的可靠性高低,通常用可靠度来度量。可靠度的定义是:“零件(或系统)在规定的运行条件下,在规定的工作时间内,能正常工作的概率。”由此定义可以看出,可靠度包含以下五个要素:

1) 对象。对象包括系统、机器、部件等,可以是非常复杂的东西,也可以是某个零件。在这里,系统和零件是相对概念,如果仅研究一台机器,则将这台机器视为一个系统。如果研究包括这台机器在内的一个大系统,则这台机器可视为零件。

2) 规定的工作条件。工作条件包括对象所处的环境条件和维护条件,即对象预期的运

行条件。产品的设计依据也不同,高,因而也是不成

3) 规定的工作示,如滚动轴承采等。应明确的是,对于某些产品,往求更长的寿命会造均衡”,即达到规

4) 正常工作就说产品失效了。品的可靠性就无法时,虽然产品的

5) 概率。从开始启动运行

如果概率密

例如,如果

其可靠度函

(2) 失效出现故障,在该品到 t 时间后,的一个基本标

可以看出,失

(3) 期望障工作时间。

对产品而直观的尺度。可靠性。期望故障前正常运故障间隔的平

行条件。产品的工作条件不同,就无法比较它们的可靠度。同时,同一产品工作条件不同,设计依据也不同,如果一切都按照最恶劣的条件进行设计,肯定是个浪费,产品成本将很高,因而也是不成功的设计。

3) 规定的工作时间。规定的工作时间一般是指对象的工作期限。可以用各种方式来表示,如滚动轴承采用小时数来表示,汽车用千米数来表示,齿轮的寿命采用应力循环次数等。应明确的是,可靠性设计并不仅仅研究如何延长产品的寿命,因为有时这是不必要的。对于某些产品,往往只要求它在一定的工作时间内达到规定的可靠度就行了。用高成本去追求更长的寿命会造成更大的浪费。所以,在可靠性设计中,人们往往更追求“总体寿命的均衡”,即达到规定的工作时间,所有零件的寿命均告结束。

4) 正常工作。所谓正常工作,是指产品能达到人们对它要求的运行效能,否则,我们就说产品失效了。在这里,失效标准是值得研究的课题,有时很难确定。没有失效标准,产品的可靠性就无法度量。有时,产品虽然能工作,但却不一定能达到要求的运行效能;而有时,虽然产品的某个零件出现了故障,但产品仍可正常工作,能达到要求的运行效能。

5) 概率。概率就是可能性,它表现为 $[0, 1]$ 区间的某个数值。根据互补定理,系统从开始启动运行至时间 t 时不出现失效的概率即可靠度为:

$$R(t) = 1 - F(t)$$

如果概率密度函数为 $f(t)$, 则它的可靠度函数为:

$$R(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt = \int_t^{\infty} f(t) dt$$

例如,如果失效时间随机变量可用指数分布来描述时,则其失效概率密度函数为:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (t > 0, \lambda > 0)$$

其可靠度函数就为:

$$R(t) = \int_t^{\infty} \lambda e^{-\lambda t} dt = e^{-\lambda t}$$

(2) 失效率。失效率有时也称为故障率或瞬时故障率,是指产品工作到某个时刻尚未出现故障,在该时刻后单位时间内发生故障的概率。对用户来讲,有时更关心正常工作的产品到 t 时间后,在后续使用过程中发生故障的可能性是多少。因此,失效率也是测定可靠性的一个基本标准,并且是个条件概率。失效率常用失效函数 $\lambda(t)$ 来表示,即:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{dF(t)}{R(t) dt}$$

可以看出,失效率表示故障即将发生的速率。

(3) 期望寿命。期望寿命又叫平均寿命,表示产品从投入运行到发生失效的平均无故障工作时间。期望寿命可用下式计算:

$$E(t) = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \int_0^{\infty} R(t) dt$$

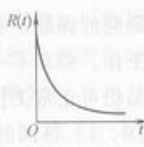
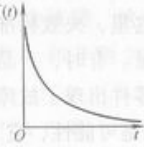
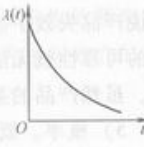
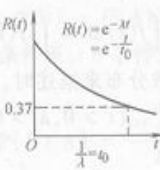
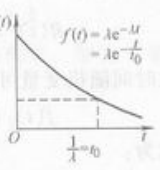
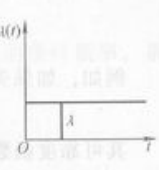
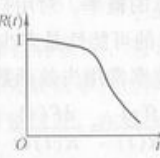
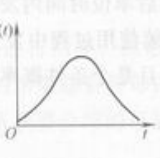
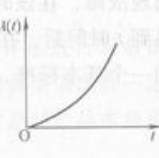
对产品而言,平均无故障工作时间是个很重要的指标,因为它是衡量产品可用性的比较直观的尺度。对于某些长寿命产品,如电视机、电冰箱、汽车等,多采用这一指标来规定其可靠性。期望寿命有两种表达形式:一种称为 MTTF (Mean Time to Failure),表示产品发生故障前正常运行时间的平均值;另一种称为 MTBF (Mean Time Between Failure),表示两次故障间隔的平均时间(用于可修复产品)。

5. 失效率类型及产品失效规律

在进行可靠性设计时,了解产品可能发生的失效率类型及产品的失效规律是非常重要的。

(1) 失效率类型。产品、零部件和材料在工作中的失效形式一般可归纳为表 5-27 所示的几种类型。

表 5-27 失效率的三种基本形式

失效率类型	特征	维修效果	可靠度 $R(t)$	失效率密度函数 $f(t)$	失效率 $\lambda(t)$
(1) 递减型	多见于合格品和次品混在一起的产品。在最初的使用时期,许多电子元件的失效率多属于此类型	不进行预防维修,因随时间增加而变化,故障选很有效			
(2) 恒定型	由于各种失效原因或承受应力的随机性致使失效随机发生。多见于比较复杂产品的最佳状态	预防维修不起作用			
(3) 递增型	由于内在的磨损、老化等致使寿命终止,失效集中发生。多见于材料的机械磨损或腐蚀等	在失效集中发生前进行替换是有效的			

1) 递减型。失效率随时间的推移而减少,特点是开始使用时容易发生故障,越到后来,发生故障的可能性越小。

2) 恒定型。故障的发生纯粹是随机的。失效率 $\lambda(t)$ 表现为一常数。由于故障的发生无法预测,因此更换零件是无效的。

3) 递增型。故障发生的可能性随时间的推移而逐渐增加,因而在故障发生前及时更换零件便可预防故障的发生。

(2) 产品的失效规律。对于一个复杂的产品而言,它的故障源是很多的,各故障源失效率的表现形式也是多种多样的,因此,造成产品失效形式的多变性。经过长期的观察和试

验,人们发现失效率随时间的推移而变化的曲线形式

根据产品失效规律分为三个

1) 早期失效率。产品在使用的初期,特别

故障发生概率大,失效率随时间的推移而下降。故障发生

工艺质量欠佳。在上市前模拟工

2) 偶然失效率。失效率基本是一常数。

3) 损耗失效率。失效率直至报废。改换部件。

6. 可靠性

(1) 可靠性

求及定量要求。可靠性保证条件在入使用时能实

性设计主要是系统,还是大系

可靠性;也要规

准,否则就无

在确定系

手,直到确定

(2) 可靠

系统的可靠性

可靠性指标,

可靠性。实

程。

为了进

立产品的可

部分的组合

图,可以得

验,人们发现失效率函数 $\lambda(t)$ 具有如图 5-23 所示的曲线形式,通常称为浴盆曲线。

根据产品失效率曲线的形状,我们可将失效率规律分为三个阶段:

1) 早期失效期。这一阶段发生在产品使用的初期,特别是“磨合”阶段。其特点是故障发生概率大,但失效率随着时间的增加而迅速下降。故障发生的原因是产品内部存在缺陷和工艺质量欠佳。因此,设计的主要任务是找出原因,采取措施,使失效率稳定下来。让成品在上市前模拟工作条件运行一段时间,也可以剔除早期失效产品。

2) 偶然失效期。这一阶段是产品的正常工作时期,此时产品的失效是随机的,失效率基本是一常数。

3) 损耗失效期。经过长时间的工作,产品已进入衰老状态,表现为失效率迅速上升,直至报废。改善损耗失效的方法在于不断提高零部件的使用寿命,或及时更换即将失效的零部件。

6. 可靠性设计技术

(1) 可靠性目标的确定。产品可靠性目标的确定是可靠性设计的第一步,包括定性要求及定量要求。定量可靠性指标是个完整的指标体系,它涉及到产品的所有要素,包括可靠性保证条件在内。对产品使用的定量可靠性指标应规定目标值和门限值。目标值是在产品投入使用能实际达到的定量指标;门限值是在使用时可以接受,但不能再降低的指标。可靠性设计主要是围绕目标值进行的。在确定可靠性目标时,要首先明确对象,看它是独立的系统,还是大系统的组成部分;同时还要规定工作条件,因为工作条件直接影响产品工作的可靠性;也要规定工作时间,离开工作时间去谈可靠性是毫无意义的;最后还要规定失效标准,否则就无法度量可靠性。

在确定系统的可靠性目标之前,应首先将复杂的系统进行分解,从研究最基本的零件入手,直到确定出整个系统的可靠性目标。当然,最终确定的可靠性目标应满足使用要求。

(2) 可靠性分配和预测。一个产品是由多个零部件组成的,所谓可靠性分配,就是在系统的可靠性目标确定之后,将该目标合理地分配给产品的各组成部分,确定各组成部分的可靠性指标,但要保证产品可靠性目标的实现。可靠性预测是估计产品在给定工作条件下的可靠性。实际上,一个合理的可靠性设计往往是一个可靠性预测和分配多次反复进行的过程。

为了进行可靠性分配和预测,一般应首先建立产品的可靠性框图,即用方框图来表示各组成部分的组合如何导致产品故障的逻辑图。根据框图,可以得到各组成部分的可靠性与产品可靠性之间的关系。该框图称为可靠性模型,它是分配及预测产品可靠性的基础。图 5-21 和图 5-22 分别是并联系统和串联系统的可靠性框图。图 5-24

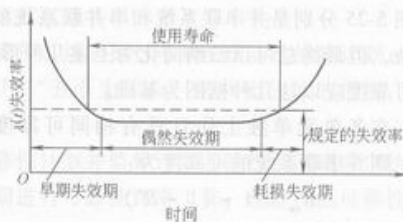


图 5-23 失效率曲线

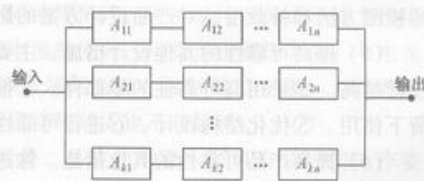


图 5-24 并串联系统

和图 5-25 分别是并串联系统和串并联系统的可靠性框图。一个复杂产品的可靠性可能十分复杂,但最终总可以归纳简化为上述几种形式(各组的 n 可能不同)。所以,研究复杂系统的可靠度应以这几种框图为基础。

在各单元单独工作且具有相同可靠度时,则并串联系统的可靠度为:

$$R_{ps} = 1 - (1 - R^n)^k$$

串并联系统的可靠度为:

$$R_{ps} = [1 - (1 - R)^k]^n$$

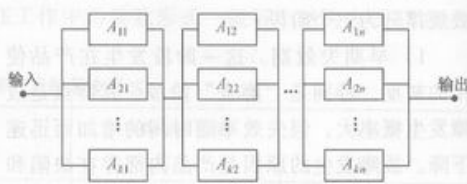


图 5-25 串并联系统

在进行可靠性分配时,应遵循一定的原则,如对系统可靠性影响大的子系统应分配较高的可靠度,对影响不大的部分分配较低的可靠度;对于较易实现高可靠度的子系统分配较高的可靠度,否则反之;在满足可靠度目标的前提下,应使整个系统的成本、研制时间、重量或体积尽可能小。

在建立可靠性模型后,可靠性分配可以采用等分法、加权分配法和动态规划法,其中动态规划法是比较理想的方法,但难度相对较大。

在进行可靠性预测时,应根据可靠性模型,首先计算确定最基本级的可靠度,再按照模型计算更高一级的可靠度,最后计算产品总的可靠度。例如,对于图 5-25 所示的串并联系统,应首先计算 A_{11} 到 A_{3n} 所有基本单元各自的可靠度,然后再逐个计算各并联组的可靠度,最后计算将各并联组串联起来的大系统的可靠度。

(3) 冗余设计。如前所述,冗余设计实际上就是在系统中并联增加一个环节。应用冗余设计技术不但可以提高系统的可靠性,而且在预防性维修时,可以不停机,提高了产品的使用率。但应用冗余技术会使产品的成本有所提高,因此应综合考虑成本和可靠性作出折衷选择。

(4) 故障模式与影响分析。故障模式与影响分析是一种可靠性分析方法,它分析产品中每一个潜在的故障模式,并确定其对产品将会产生的影响,再把每一个潜在的故障模式按其重要程度进行分类,找出既没有冗余又没有替代工作程序作为补救措施的“关键故障”,最后采取必要的提高可靠性的措施。

故障模式与影响分析的工作步骤如下:①明确被分析的产品及其工作条件。②绘制可靠性框图。③确定各组成部分的故障模式,以及它们对产品可靠性的影响。④对每一故障模式评价其可能的后果,并确定它们的级别,如灾难性的(I级)、致命的(II级)、临界的(III级)、轻度的(IV级)等。⑤对每一故障模式确定检测方法和补救措施。⑥研究所采用的检测方法和补救措施对产品设计的影响,并修改设计。

(5) 提高可靠性的其他设计措施。主要包括:①尽可能简化系统,系统越简单,其可靠性就越高。②采用高可靠性的零部件。③推行标准化。④减额使用,即使零部件在更低的负荷下使用。⑤优化结构设计。⑥进行可靠性增长试验。

(6) 提高产品可靠性的其他措施。除进行可靠性设计外,要真正提高产品的可靠性,还应在制造、使用和管理等方面采取各种措施。

在制造方面,可以通过筛选零部件使产品达到固有的可靠性;通过进行工序质量控制,提高零部件的可靠性;通过进行模拟工作条件的试运行,尽早发现故障;对于特别重要的系

统,还应通过比

在使用方面
时发现并迅速排
免“头疼医头、

在可靠性管
可靠性管理的任
证体系等。

三、维修

维修性是产
会出现各种故障
状态的能力如何
产品恢复正常状

(1) 简化线
的次数和所需的
格和数量;尽量
采用易于更换的
类型的设计等。

(2) 进行可
尽量争取不拆的
明。

(3) 维修
的部件要采取
其是高电压场
容许限度的电

(4) 提高
时间;明确维

(5) 进行
长的零部件;
境条件(如采

(6) 防错
件应有不同结
装;要给出必
正负极接触的
的接线比较复

(7) 人
势,避免跪、
度,噪声和振

(8) 采用

统,还应通过比正常条件更恶劣的工作环境进行运行试验。

在使用方面,应严格遵守操作规程,避免误操作;切实执行可靠性预防性维修计划;及时发现并迅速排除故障。在出现故障时,可以应用“五个为什么”法找出故障的根源,避免“头疼医头、脚疼医脚”的现象。

在可靠性管理方面,制定详尽的、可行的可靠性计划并监督计划的执行;明确规定执行可靠性管理的任务、组织机构、职责和权力;定期进行可靠性评审工作;建立产品可靠性保证体系等。

三、维修性设计简介

维修性是产品可信性的重要内容之一。因为不管产品设计得多可靠,它在工作过程中总会出现各种故障,出现故障就有维修问题。而产品的故障能否维修,维修后恢复到正常工作状态的能力如何,维修所花费的工作量大小,维修的成本如何,维修所花费的时间等因素对产品恢复正常状态都有极大的影响。这一节只介绍维修性设计的基本概念。

(1) 简化维修过程,降低维修频率。在设计中应力求降低维修的复杂性,减少各种维修的次数和所需的时间。可采取如下措施:减少进行维修所需测试设备和维修工具的品种、规格和数量;尽量采用标准通用测试及维修工具;尽量减少备用零部件的品种、规格和数量;采用易于更换的结构;备用件的互换性要好;采用模块化设计;采用插件兼容设计,如PC类型的设计等。

(2) 进行可达性设计。对发生故障的零部件进行更换时,要注意留有足够的操作空间;尽量争取不拆卸其他零部件进行故障部件的维修和更换。维修和更换部位应能得到足够的照明。

(3) 维修的安全性设计。在产品设计时,一定要保证好维修的安全性;对于有安全隐患的部件要采取防护措施;对可能危及维修人员安全的部位应用各种方式给出警告标志(尤其是高电压场合和有毒场合);对于电气系统,要采取措施防止维修人员被电击;对于超过容许限度的电磁辐射必须加以防护等。

(4) 提高维修效率设计。对于常发、多见故障维修项目,要制定出标准维修程序及所需时间;明确维修人员的技术等级;产品设计得要便于维护;故障部位要便于拆卸等。

(5) 进行耐用性设计。提高产品的耐用性就减少了维修频率。产品设计时,要选用寿命长的零部件;在零件的工作负荷、结构设计和工艺设计等方面提高零部件的耐磨性;改变环境条件(如采取密封措施),延长零部件的使用寿命。

(6) 防错设计。产品设计要保证操作人员不会发生误操作。对可能出现安装错位的零部件应有不同结构的定位装置;对外形相近但功能不同的零部件,应从结构上保证不能互换安装;要给出必要的安装标记等。对于电气设备上干电池的安装,应指出正负极方向;与电池正负极接触的部位的结构形状应符合一般习惯(弹簧端是负极,接触端是正极)。PC背面的接线比较复杂,但由于采用了防错设计,即使不懂接线的人也不会搞错。

(7) 人机工程设计。除了应有足够的操作空间外,还应使维修人员具有合理的操作姿势,避免跪、蹲、卧、趴等易于疲劳的姿势。维修场所的环境应舒适宜人,有足够的照明度,噪声和振动要小,维修操作要省力。

(8) 采用故障自动检测和修复功能。对于特别重要的设备,要增加故障的自动检测和自

动修复功能,使得系统能够识别正在和即将发生的故障,并自动采取措施在故障出现前予以排除。对于已经出现的故障,也可启动故障排除系统自动将故障排除。

随着计算机网络的快速普及,企业的产品维修人员可以通过网络指导用户进行维修,也可通过网络启动修复机构进行故障的诊断和修复。

在维修性设计中,还包括产品的测试性、维修性的分配和预测及维修性验证等内容,此处就不再介绍了。

复习思考题

- 5-1 三次设计与质量功能配置、参数设计和容差设计有什么关系?
- 5-2 为什么说参数设计是三次设计的核心?
- 5-3 结合图 5-12 简要说明质量屋各部分的作用和它们之间的相互关系。
- 5-4 归纳参数设计的步骤和方法。
- 5-5 自己找资料了解正交表的基本理论。
- 5-6 将质量 $m=1\text{kg}$ 的物体进行抛掷,设抛掷水平距离 y 与作用力 F 、仰角 α 和方向 (θ) 间的关系式为 $y = \frac{1}{g} \left(\frac{F}{m} \right)^2 \sin^2 \alpha$, $g = 9.807\text{m/s}^2$ 。现设目标距离为 100m , 力的范围为 $1 \sim 20\text{N}$, 角度 α 为 $5^\circ \sim 40^\circ$, 试进行参数设计。

误差因素的三水平为: 质量 (kg) 0.9, 1, 1.1; 力 (F): -10% , 0 , $+10\%$; 角度 (α) -5° , 1° , 5° 。

(1) 用综合误差因素法, 分别求出稳定条件, 再调整到目标值。

(2) 作出显著因素的效应图。

- 5-7 为减少废气中 CO 含量, 取 A、B、C、D、E、F、G 共 7 个因素进行试验, 每个因素取两个水平, 用正交表 $L_8(2^7)$ 进行内设计。每号试验用三种行驶状态行驶, 测量 CO 含量, 数据如表 5-28 所示。

表 5-28 数据表

No.	A 1	B 2	C 3	D 4	E 5	F 6	G 7	R_1	R_2/g	R_3	η/dB
1	1	1	1	1	1	1	1	1.04	1.20	1.54	-2.1
2	1	1	1	2	2	2	2	1.42	1.76	2.10	
3	1	2	2	1	1	2	2	1.01	1.23	1.52	-2.1
4	1	2	2	2	2	1	1	1.50	1.87	2.25	
5	2	1	2	1	2	1	2	1.28	1.34	2.05	-4.1
6	2	1	2	2	1	2	1	1.14	1.26	1.88	
7	2	2	1	1	2	2	1	1.33	1.42	2.10	-4.4
8	2	2	1	2	1	1	2	1.33	1.52	2.13	

用望小特性计算 2、4、6、8 号试验的 η 值, 进行方差分析, 并确定最佳条件。

- 5-8 某产品输出特性为抗拉强度, 希望越大越好。今用正交表 $L_9(3^4)$ 安排试验, 每

号条件取两

5-9 加
为 60 元, 设

5-10
在工厂内,

5-11
 $y < 180\text{mg/g}$

下: A (磨料
 $\pm 0.5\%$ 。若
 $L_9(3^4)$ 正交
半, 此设备

号条件取两个样品，其抗拉强度的测量值见表 5-29 所示，试确定最佳参数组合。

表 5-29 抗拉强度测量值

因素 列号 No.	A	B	C	D	y	
	1	2	3	4	y ₁	y ₂
1	1	1	1	1	550	530
2	1	2	2	2	590	580
3	1	3	3	3	840	820
4	2	1	2	3	570	560
5	2	2	3	1	570	560
6	2	3	1	2	560	600
7	3	1	3	2	810	860
8	3	2	1	3	710	670
9	3	3	2	1	620	600

5-9 加工一零件，其规格为 (100 ± 5) mm，当超出规格时，即作为废品，此时的损失为 60 元，试求该零件尺寸的质量损失函数。

5-10 设汽车车门的尺寸功能界限 $\Delta_0 = 3\mu\text{m}$ ，车门关不上造成的社会损失 $A_0 = 600$ 元，在工厂内，车门尺寸不合格报废造成的损失 $A = 120$ 元。试求车门的出厂公差。

5-11 柱状颗粒活性炭的一项主要指标是亚甲蓝脱色力 y ，要求其越大越好。当 $y < 180\text{mg/g}$ 时，产品丧失功能，损失为 $A_0 = 352200$ 元/批，设工序中各因素及波动范围如下： A （磨粉时间）： $\pm 1\%$ ； B （成型压力）： $\pm 3\%$ ； C ：炭化温度 $\pm 2\%$ ； D （炭化时间）： $\pm 0.5\%$ 。将现行条件作为第二水平，按上述因素的波动范围确定第一、第三水平，配置于 $L_9(3^4)$ 正交表中，试验结果如表 5-30 所示。如果引进一台自控设备，各因素波动可减少一半，此设备每年折旧费为 5 万元，以每年生产 100 批计，问引进该设备是否合理？

表 5-30 试验结果

No.	A	B	C	D	y/(mg/g)
	1	2	3	4	
1	1	1	1	1	253.5
2	1	2	2	2	249
3	1	3	3	3	249.5
4	2	1	2	3	252.5
5	2	2	3	1	233.5
6	2	3	1	2	244.5
7	3	1	3	2	253
8	3	2	1	3	241
9	3	3	2	1	242

5-12 说明质量损失函数在公差设计中的作用。

现代质量工程

- 5-13 什么是可信性设计?它包括哪些内容?

- 5-14 列出维修保障性应包括哪些内容?

- 5-15 提高产品可靠性的意义有哪些?

- 5-16 提高产品维修性的意义有哪些?

一、质量数

产品的质量指
常不规定具体的质
来判断。对于定量
度、硬度、噪声等
易于判断产品质

在质量控制:

目前, 利用质量

产品的质量

计量值数据

九、时间、成分

计数值数据

癰占數等。

对于计数值

粒计数的数据。

缺陷数 气孔率

二、质量

实践表明，
同的加工方法

件的几何尺寸

数据具有分散

数据的分散
材料的内部性

另一方面

在一个中心值

据具有集由的

据具有条件的
质量数据

握了质量数指

握了质量数据

三、质

现代质量