

可计算性项目的三次设计

中国现场统计研究会三次设计组 编著

北京大学出版社

内 容 提 要

搞好产品设计和生产过程的设计是提高产品质量和降低成本的关键性阶段。所谓可计算性项目(产品或课题)的设计,指的是不通过做试验,而是利用项目中的性能指标同各有关(元器件)参数之间的已知函数关系的计算来进行设计。通过电子计算机对于可计算性项目的设计可以进行得周到、合理、透彻。

三次设计指的是系统设计、参数设计和容差设计。其中参数设计是十分重要的质量管理对策。它可分为直接择优和稳定性择优两类。后者是在元器件有误差波动的情况下,选择元器件的一组好参数,使产品在整机性能上稳定性好、使用寿命长。

本书系统地介绍了三次设计的方法。在参数设计和容差设计中,主要采用正交表方法。书中收集编入了国内在电路、光学、声学、化学、化工、兵器、汽车、锅炉以及在生产计划等各方面应用三次设计取得的成果。书后附有比较系统的、中等规模的不少于三个位级的常用正交表。本书可供设计人员、工程技术人员、管理人员、科研人员和大专院校师生等参照使用。

可计算性项目的三次设计

中国现场统计研究会三次设计组 编著

责任编辑 徐信之

*

北京大学出版社出版

(北京大学校内)

北京大学印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

787×1092毫米 16开本 12.75印张 310千字

1985年3月第一版 1985年3月第一次印刷

印数: 00001—25,000册

统一书号: 13209.100 定价: 2.20元

目 录

第一篇 绪 论

第一节 可计算性与三次设计.....	(1)
1.1 可计算性.....	(1)
1.2 三次设计.....	(2)
1.3 选择合用的正交表.....	(3)
1.4 位级的选取.....	(4)
1.5 计算机自动选取位级.....	(5)
第二节 质量损失函数.....	(6)
2.1 成本相同的假定.....	(6)
2.2 质量损失函数及其近似表达式.....	(6)
2.3 机能界限与出厂公差.....	(7)
参考文献.....	(9)

第二篇 产品参数的直接择优

(一) 并联反馈偏置电路的参数设计.....	(10)
第一节 电路的系统设计.....	(11)
第二节 利用正交表进行参数设计.....	(13)
(二) 汽车振动参数的最佳匹配.....	(19)
第一节 设计目的与考核指标.....	(19)
第二节 确定设计方案,分析计算结果.....	(20)
(三) 在兵器设计中的应用.....	(22)
第一节 引言.....	(22)
第二节 设计要求概述.....	(23)
第三节 设计方案择优.....	(24)
(四) 光学多层膜自动设计.....	(27)
第一节 引言.....	(27)
第二节 光学多层膜反射率 R 的计算方法.....	(28)
第三节 自动优化设计方法简介.....	(29)
第四节 设计实例.....	(29)
(五) 高频负反馈对电路的设计.....	(31)
第一节 引言.....	(31)

第二节	电压并联负反馈对电路及性能指标	(32)
第三节	计算公式	(32)
第四节	因素和位级的确定	(34)
第五节	计算结果与分析	(34)
第六节	投产与经济效益	(37)
(六)	LC 滤波器的参数设计	(37)
第一节	系统设计	(38)
第二节	参数设计	(39)
(七)	24V3A 直流稳压电源电路的参数设计	(41)
第一节	24V3A 直流稳压电源电路及技术指标	(42)
第二节	直流稳压电源的有关计算公式	(44)
第三节	有关元器件参数原始数据确定的几点说明	(46)
第四节	因素和位级的确定	(47)
第五节	计算过程及分析。结果的应用	(49)
(八)	光学系统设计	(52)
第一节	光学系统评价函数的一般特性	(52)
第二节	用正交法进行光学设计的基本思想	(53)
第三节	微光物镜的设计	(54)

第三篇 单参数择优

利用相关系数设计数字式温度计	(57)
第一节 相关系数的性质	(57)
第二节 问题	(58)
第三节 考核指标	(59)
第四节 用 0.618 法单参数择优	(59)
第五节 商式与差式	(60)
第六节 温度计的设计	(61)

第四篇 产品的稳定性择优

预备知识	(63)
第一节 内干扰。外干扰。误差波动	(63)
第二节 参数设计(提高稳定性)的意义	(64)
第三节 稳定性指标	(66)
第四节 容差设计和调整系统偏差中用到的几个公式	(67)
第五节 有约束情形的稳定性指标	(70)
(一) 发射物体达到指定的距离	(73)
第一节 问题的提出	(73)

第二节 参数设计	(73)
第三节 稳定性指标	(76)
(二) OTL电路的中点电压	(79)
第一节 系统设计	(79)
第二节 参数设计	(80)
第三节 容差设计	(84)
第四节 其它	(87)
(三) 电视机自动增益控制电路	(90)
第一节 按约束条件求解	(91)
第二节 稳定性正交设计	(93)
(四) 废热锅炉的出口温度	(96)
第一节 问题的提出	(96)
第二节 出口温度 T_2 的表达式	(96)
第三节 参数设计	(97)
(五) 惠斯登电桥	(101)
第一节 系统设计	(101)
第二节 参数设计	(102)
第三节 容差设计	(108)
第四节 系统偏差的校正	(111)
(六) 稳压电源	(111)
第一节 系统设计	(111)
第二节 参数设计	(112)
第三节 参数设计的另一种程序	(117)
第四节 有约束的参数设计	(120)
第五节 容差设计	(123)
第六节 系统偏差的调整	(126)
(七) 时间鉴别器	(126)
第一节 前言	(126)
第二节 电路原理及计算公式	(127)
第三节 稳定性选优方案	(129)
第四节 计算结果。实验验证	(131)

第五篇 课题参数的择优

(一) 生产计划的制订	(133)
第一节 产品结构分析	(133)
第二节 产品产量与原料量间的数量关系	(135)
第三节 用正交法调整产品结构	(136)
第四节 近似线性规划的求解	(138)

(二) 非线性最小二乘法(化学应用一例).....	(139)
第一节 加质子常数满足的公式.....	(139)
第二节 考核指标.....	(141)
第三节 计算结果与最优解.....	(143)
(三) 声表面波谐振器等效参数的精密确定.....	(145)
第一节 引言.....	(145)
第二节 计算公式和目标函数.....	(146)
第三节 因素位级表和评分标准.....	(146)
第四节 计算机程序的特点.....	(147)
第五节 计算结果及结语.....	(149)
(四) 非线性回归参数的估计(化学应用一例).....	(151)
第一节 前言.....	(151)
第二节 新的模型.....	(152)
第三节 正交选优.....	(153)
第四节 进一步搜索.....	(154)
(五) 非线性回归参数的估计(化工应用一例).....	(155)
第一节 引言.....	(156)
第二节 应用实例.....	(156)

第六篇 习 题

附录1 正交表

三位级.....	160	十二、 $L_{25}(5^6)$	171
一、 $L_9(3^4)$	160	十三、 $L_{50}(5^{11} \times 2^1)$	171
二、 $L_{18}(3^7 \times 2^1)$	160	十四、关于 $L_{50}(10^1 \times 5^{10})$	171
三、 $L_{18}(6^1 \times 3^6)$	160	十五、 $L_{125}(5^{31})$	172
四、 $L_{27}(3^{13})$	161	七位级.....	175
五、 $L_{54}(3^{25} \times 2^1)$	161	十六、 $L_{49}(7^8)$	175
六、关于 $L_{54}(6^1 \times 3^{24})$	162	十七、 $L_{98}(7^{15} \times 2^1)$	176
七、 $L_{81}(3^{40})$	163	十八、关于 $L_{98}(14^1 \times 7^{14})$	177
四位级.....	165	其它.....	178
八、 $L_{16}(4^5)$	165	十九、 $L_{64}(8^9)$	178
九、 $L_{32}(4^9 \times 2^4)$	165	二十、 $L_{81}(9^{10})$	179
十、 $L_{64}(4^{21})$	166	二十一、 $L_{121}(11^{12})$	181
十一、 $L_{128}(4^{41} \times 2^4)$	167	二十二、 $L_{169}(13^{14})$	183
五位级.....	171		

附录2 标称值系列表

- (一) 电阻器标称阻值系列(SJ618-73)(186)
- (二) 精密电阻器标称阻值系列、精密电容器标称容量系列
及其允许偏差系列(SJ619-73)(186)

附录 3

- 中国科协代表团参加美国科学促进协会年会的报告摘引.....(188)

附录 4

- 第六篇习题答案.....(190)

第一篇 绪 论

产品的质量是设计质量与生产质量的总和。搞好产品的研究、试验或设计是提高产品质量的关键。

通过做试验提高产品质量或者改进工艺参数的多因素选优问题,请见电视讲座《正交试验法》^[1]。这类项目十分广泛,它们是提高生产水平并取得经济效益的巨大潜力所在。

本书不是通过做试验,而是利用产品性能的指标同有关各(元器件的)参数之间的函数关系的计算,选出一组好的参数值,使产品的性能指标达到最优化设计的要求,这就是可计算性产品的参数设计问题。还有一些生产计划、管理以及科研课题,也需要通过正交法,借助函数关系的计算,找到优良的设计参数组。

在日本,广泛且反复地使用正交法,对它的工业发展起到了巨大的作用。我国对正交法经过初步应用,就单项说,效果更为明显;但普及规模与日本相比有很大的差距。其中用正交法对可计算性能的产品进行三次设计(系统设计、参数设计与容差设计)是很重要的工作。田口玄一和吴玉印在三本书^[2,3,4]中,都谈到了这个方法及其巨大的经济效益。近两年来,我们推广应用这个方法也取得了一些成果,既提高了设计质量,又增加了经济收益。

我们把可计算性产品的设计,分为直接择优与稳定性择优两大类,分别编在第二篇与第四篇中。所谓直接择优,指的是能够根据某一数量化的指标,直接判别设计条件的优劣,选择优良的设计参数组。所谓稳定性择优,是在考虑影响产品性能指标的部分因素(参数)有误差波动的情况下,首先,要选择好条件(好的参数组)使产品性能指标尽可能稳定(我们是通过误差因素的正交表来刻画产品的稳定性)在设计的目标值附近;其次,规划诸零部件(参数)的波动幅度(即精度等级),使得

$$\text{质量损失} + \text{成本损失} = \text{总经济损失}$$

达到最小。第三篇是一项单参数直接择优的产品设计。第五篇收编了一项生产计划、一项声学 and 一项化工课题及两项化学课题的参数设计。

本书对可计算性项目三次设计的方法作了介绍,并收集了国内的应用成果。不妥之处,请读者提出改进意见。

第一节 可计算性与三次设计

1.1 可计算性

除了通过试验(常采用多因素正交法)提高产品性能的项目以外,与之对照的,有一类产品(如许多电器产品、光学仪器、声学器材、兵器、汽车、锅炉、射击问题等等)的性能指标同各有关的元器件(参数)之间具有已知的函数关系。对这类产品,给定一组参数,通过这个函数,可以计算出产品的性能指标,即根据各个元器件的参数,通过计算(而不是做试验),基本上能够确定产品的使用性能。此外,有一些生产计划、管理或科研课题,也需要借助函

数关系的计算,寻求优良的参数组。这就是可计算性的含义。

用计算方式代替做试验,只要计算公式符合实际情况、计算的结果是正确的,它就具有以下两种优越性:

(a) 数值计算比起动手做试验来说能够节省大量的人力、物力和时间。由于近代电子计算机能够快速运算,所以不怕计算过程复杂。以第四篇(六)稳压电源的参数设计为例,四轮 L_{169} 共涉及 $169 \times 4 = 676$ 个设计条件。每个条件按 L_{27} 取27个误差样品。因此利用公式[第四篇(六)、(1)],共计算了 $27 \times 676 = 18252$ 个样品。只要编好公式[第四篇(六)、(1)]的子程序,代入不同的参数组,反复运用这个子程序,这正是计算机的特长。18252组参数,上机时间不到五分钟,有条理地打印出系统的综合结果。若来组装这些电路,18252台的任务,就各方面的要求而论,实际上是无法完成的。

(b) 以组装一台电路为例,各个元器件(如电阻、电流放大倍数等)的实际值都有着或大或小程度的偏离,因而(影响到)实测的特性值是不准确的。然而,按照计算方式来设计,由于各个参数(自变量)值容易精确到8到10位有效数字,所以只要计算原理(函数)正确,计算出的特性值(因变量)可以异常精确。

鉴于以上两条,对于可计算性的项目用计算方式代替做试验,一方面,计算结果更为准确、深入和透彻;另一方面,又易于广泛进行。这就大大提高了这类项目的设计水平。

有时候,推导计算公式比较困难。近年来,许多技术领域发展了计算机辅助设计(CAD)的工作。以电子线路为例,有电路分析程序可资利用。只要把电路输进计算机,公式的求解一概由计算机进行,并由计算机打印出所需求的综合计算结果。例如,参考文献[5]。

诚然,可计算性项目目前所占的比例还很小(绝大部分是试验实测的项目)。但是,怎样扩大可计算性的领域,把目前尚不可计算的项目发展成可计算的项目,是该技术领域和数学相结合的边缘学科应予解决的重大科研任务。

本书主要对于可计算性多因素项目的参数设计和容差设计,利用正交法来求出它们的数值解。

1.2 三次设计

对于可计算性产品的设计,可由下列三个阶段组成:

1. 系统设计(也叫第一次设计);
2. 参数设计(也叫第二次设计);
3. 容差设计(也叫第三次设计)。

对某种性能的产品,专业技术人员利用专业知识与技术就整个系统结构:例如,各个零部件的能效以及它们如何连接,材料的选用,产品的外观与颜色等等进行设计,这种设计叫做系统设计。在系统设计阶段,还应求出产品的使用性能指标同各有关元器件(参数)之间的函数关系。这部分工作目前主要由专业技术人员利用专业知识和数学知识来完成。在此阶段的数学工作一般是布列有关函数的方程,并解出这个函数。对于这类工作,实验设计法通常是无能为力的。

系统设计之后,就要决定系统因素的好的参数组合。什么叫做好参数组呢?本书主要分两类项目:第一类是“直接择优”的项目,优良参数组使得产品的性能指标达到优良的状态,如本书第二、三、五篇中列出的那些项目;第二类是“稳定性择优”的项目,安排在第

四篇中。通过选择优良的参数组,提高产品指标的稳定性。一组好参数,通常表现在,即使环境改变,或是零件与材料有所波动、劣化时,按这种参数组合制造出的产品在机能(作为目标特性)上的波动小,稳定性好。对于可计算性的项目,这种参数设计不是搞试验,而是通过系统设计中已经求出的函数关系,利用正交选优法,根据计算结果来确定系统因素的好参数组合。

参考文献[3,4]中写道:发展中国家的某些电器产品,为什么性能不好?不稳定?是元器件的质量不高吗?不是的。实际上,他们是把好不容易挑选出来的很少几个质量高的元器件,用来组装产品,其性能还是比不上日本(发达国家)的廉价产品——主要用价廉的三级品组装的产品。原因在哪里?主要的差别在于:前者未用参数设计的方法,即令用质量高的一级品元器件,但由于参数之间的搭配不合理,整机的性能还是不稳定。而在发达国家,由于运用了参数设计,组装的参数搭配合理,因而即令元器件的波动大,是三级品,但整机的性能还是稳定的,误差很小,可靠性高,比发展中国家的贵产品的性能还要好。因此,对发展中国家来说,用参数设计方法找到稳定性好的合理参数组合,是最重要的质量管理对策!

在参数设计决定了系统诸因素的设计值之后,接着进行容差设计。在容差设计阶段,除了使产品满足容差(公差的一半叫容差)的要求之外,对于影响指标大的诸因素(零部件),应该采用波动幅度小的一级品或二级品?还是应该采用波动幅度大的三级品?虽然用高精度的零部件会使产品的质量提高(从而质量损失下降,经济收益增加。关于质量损失的有关概念请见下一节),但是它将使成本上升。若成本上升的金额低于质量损失下降的金额,那么用高精度的零部件是合算的、可行的;否则是不合算的。因此,在容差设计阶段,要规划零部件的精度等级和产品的质量、成本以及市场等问题。

参数设计是容差设计的基础,只有搞好了参数设计之后,才有条件搞好容差设计。

1.3 选择合用的正交表

在正交法试验中,考虑到试验的代价,对于适合于多分批的项目,为了节省人力、物力和时间,本着“分批走着瞧”的原则,一般是少分位级、选用小表来安排试验。对于可计算性的项目,由于电子计算机擅长于一个子程序的多次循环,能承担的计算量很大,所以当因素不很多时,为了节省上机的回数(趟数,即指处理一组设计条件的批数),对于设计参数正交表,通常可以扩大用表。当参数即因素的个数已经固定时,扩大用表的含意一般不是说增加列数,而是指多分位级,适当增加行数。正是由于这种情况,所以在本书中很少用到各列都分两个位级的表,所以在后面附录1的正交表中,一律不列出二位级的表。读者若需用二位级的表时,可查阅参考文献[1]及有关哈达玛矩阵的资料。[当正数 m 不大时,一般都存在有 $L_{4m}(2^{4m-1})$ 。]

下面分几种情况,来说明一下选择用表的大致办法。

(I) 一轮只用一张设计正交表

(a) 如果占用计算机的时间可以承受,不嫌长,那么,可以容许多分几个位级。一般说来:不超过6种因素,设计参数表可以用第十二表 $L_{25}(5^6)$ [例如,第二篇的(五),第四篇的(二)等];7或8种因素,可用第十六表 $L_{49}(7^8)$;9种因素用 $L_{64}(8^9)$;10种因素用 $L_{81}(9^{10})$;11或12种因素用 $L_{121}(11^{12})$;13或14种因素用 $L_{169}(13^{14})$ 。当因素增多时,不能无休止地增加位级数目,因为这样一来会大大增加设计条件的次数,从而造成了很大的浪费。

位级分得太多也过于烦琐。因此, 15 或 16 种因素可用第十七表 $L_{98}(7^{15} \times 2^1)$ 或第十八表 $L_{98}(14^1 \times 7^{14})$; 17 到 31 种因素可用第十五表 $L_{125}(5^{31})$; 32 到 41 种因素可用第十一表 $L_{128}(4^{41} \times 2^4)$ 。

(b) 如果感到(a)中用表占用上机的时间偏长, 想压缩一下位级的个数以减少设计条件的次数, 那么, 不超过 8 种因素可改用两张 L_{18} 中的一张; 9 到 12 种因素可改用第十三表 $L_{50}(5^{11} \times 2^1)$ 或第十四表 $L_{50}(10^1 \times 5^{10})$; 11 到 14 种因素可改用两张 L_{98} 中的一张; 14 到 25 种因素可改用第五表 $L_{54}(3^{25} \times 2^1)$ 或第六表 $L_{54}(6^1 \times 3^{24})$; 26 到 40 种因素可改用第七表 $L_{81}(3^{40})$ 。

(c) 如果还嫌上机的时间偏长, 需要进一步缩减位级数和试验条件数, 那么, 7 到 9 种因素还可改用第九表 $L_{32}(4^9)$; 7 到 13 种因素还可改用第四表 $L_{27}(3^{13})$; 14 到 31 种因素还可改用 $L_{16}(2^{15})$, $L_{24}(2^{23})$ 或 $L_{32}(2^{31})$ 。

当因素多于 40 种时, 找到相应的大表并不困难。具体情况具体对待。我们宁愿有了具体要求以后, 当时排出对口的正交表。这类表由于用到的机会比较少, 而所占的篇幅又很大, 所以书末附录 1 中不予列出。

(II) 一轮由几张三位级的设计正交表联合组成

有了前面的用法(I)以后, 这里的(II)用到的机会已经不多了。但由于组合设计的离散性, 对于少数空档的情形, 仍有用到的价值, 所以(II)可以作为用法(I)的一种补充办法。

(a) 例如, 对于 13 种因素, 按照(I)中的办法, 可能对(a)用 $L_{169}(13^{13})$, 对(b)用 $L_{98}(7^{13})$ 都嫌次数偏多; 而对(c)用 $L_{27}(3^{13})$ 又嫌位级太少。这时, 可联合使用两张 $L_{27}(3^{13})$, 共分 5 个位级考察 54 个设计条件。第一张 L_{27} 的三个位级 1, 2, 3 顺次对应位级 1, 3, 5; 第二张 L_{27} 的三个位级 1, 2, 3 顺次对应位级 2, 3, 4。

有时候, 人们愿意联合使用四张 L_{27} , 分 9 个位级考察 108 个条件(第一张 L_{27} 的三个位级是位级 1, 5, 9; 第二张是 2, 5, 8; 第三张是 3, 5, 7; 第四张是 4, 5, 6); 或者联合使用 5 张 L_{27} , 分 11 个位级考察 135 个条件。(三张 L_{27} , 分 7 个位级考察 81 个条件。)第四篇(六)稳压电源第三节, 用 6 张 L_{27} , 分 13 个位级考察了 162 个条件, 同每轮仅使用一张 $L_{169}(13^{13})$ 进行了对照。

对照的结果表明, 作为一种趋势(不是作为肯定的规律), 开始几轮, 由于第一张 L_{27} 中两端(低、高)位级相遇的机会多, 设计进展的效率较高; 而后面几轮, 由于用量已大致选准, L_{169} 的结果在多数场合显得更好一些。

(b) 又如, 对于 32 到 40 种因素, 可用几张 $L_{81}(3^{40})$ 联合考察。

(c) 当因素更多且 5 位级不适用时, 可用两张 3 位级表联合考察。

1.4 位级的选取

对于某个因素, 若要详加考察, 那么就多分几个位级。若勿需详细考察, 就少分几个位级。若位级的个数较多, 而某些因素不便分这样多的位级时, 可以采用拟位级的手法^[1]。

假若要在范围 $[m, M]$ 内来考察某个因素, 这里的 m, M 分别是该因素可以取用的最小值与最大值。而且准备分 4 个位级来研究, 那么可以将 $[m, M]$ 等分成 5 段, 其中的 4 个分点 x_1, x_2, x_3, x_4 为 4 个位级的用量(即 m, x_1, x_2, x_3, x_4, M 为等差数列)。也可以不用等分的办法, 而用等比的办法分成 5 段(这时 m, x_1, x_2, x_3, x_4, M 为等比数列)。假若要分 i 个位级, 可依次类推。许多元器件系列化(标称化)的值, 都是采用等比的办法得到的(请见附录 2 电阻与电

容系列化的数值表)。

当每一轮正交表选优完毕后, 根据本轮的结果, 决定是否需要进行下一轮。有些项目, 使用一轮正交表, 就已得到充分够用的结果。如本书第二篇的(二)、(三)、(五); 第四篇的(一)、(三); 第五篇的(一)等。

有些问题, 用一轮正交法还达不到解决问题的目的。这时应根据本轮的结果, 来决定下一轮要考察哪些因素, 这些因素分多少个位级, 以及位级该如何选取。

既然还要进行下一轮, 通常意味着想寻求更好的参数组合。在多数情形, 下一轮的用表和本轮已用的表相同。本书为了打散设计条件的相对位置, 增大参数组合的代表性: (I)若每轮使用同样的一张正交表, 每换一轮, 各列因素的位置都往后顺延一列。(II)在一轮中联合使用(位级量不同)相同的一张表时, 也是每使用一次, 各列因素的位置都往后顺延一列。具体用法请见第二篇的(一)、(四); 第四篇的(二)、(五)、(六)和第五篇的(二)、(三)、(四)等。

怎样确定下一轮的位级用量? 现在根据有关项目的计算经验, 再概括地叙述一下。在计算结果方面, 主要参照本轮该因素的趋势图。在[1]中, 我们曾强调指出: 计算结果在绝对的意义上看是不可靠的。对于因素较多的参数设计, 情况尤其是这样! 就是说, 把各个因素列的好位级硬性组合在一起, 往往比不上直接看的好条件, 而是效果较差的条件。因此骑着马找马, 比起参照计算结果的趋势图而言, 更应重视直接看的几号好条件。二者结合起来, 范围可适当放宽一点, 决定下一轮该因素的有关位级用量。如果还想继续提高, 也可以适当多增加几轮设计正交表。

当最优参数组合(向量)的大致位置已很清楚, 每个参数(分量)的变化幅度已很狭窄时, 倘若时间许可, 不妨最后增加一轮“完全组合”, 以求出最优参数组合的肯定解[例如可参看第五篇的(二)]。

1.5 计算机自动选取位级

1.4 是就每算完一轮后, 充分运用以前各轮的计算结果, 通过合理思维, 人为地选定下一轮的位级用量(亦即所谓手工操作的方式)。根据本书部分项目[主要指第二篇的(四), 光学项目第三节中7; 和第五篇的(三), 声学项目]的重要经验可知, 如果有条件能够实现, 最好是采用计算机自动操作的方式。下面叙述一种主要的轮廓, 供读者灵活使用时参考。

从初始(中心)条件出发, 每种因素的中心位级就是该因素初始条件的值。按等比数列或等差数列取定其它位级的值, 公比或公差在不同的轮次可以按照指定的数学规则来改变。算完每一轮后, 用正交表直接看的好条件和中心条件相比较, 用二者中的较优者作为下一轮的中心条件。每换一轮, 为了打散设计条件所在的位置, 各列因素所在的列号都往后顺延一列。把上述步骤编进程序, 由计算机自动地定出下一轮各因素的位级用量, 一轮接着一轮进行。通常按照一定的上机时间, 或者不能继续改进时告一段落。

通常没有把上一轮算一算的好条件编进程序中来作比较。原因在于, 算一算的好条件能改进的机会很小; 为了简化程序工作的手续层次, 就把这部分信息量给精简了。

单就一轮而论, 停留在单纯信息量的说法上, 自然是(手工操作)人为程序的相对效率较高。但这需要付出不小的数据处理工作量和增加上机的回数。而在实际上, 目前不少计算机的速度已比较快, 时间常常拖延在打印数据的环节上。计算机自动操作要求打印的数据很

少。一般是：初始条件及其达到的指标水平；停机条件及其达到的指标水平；少量特殊要求打印的中间数据；以及在开始和结束时关心的详细数据。打印占的时间短，时间主要用在计算过程上。单就一轮而言，可能效率很低。但很快能进行几十轮、几百轮。那怕是胡碰乱撞，也能获得具有高水平结果的条件。

编自动操作程序，有一个环节需要仔细安排。就是要周到地定出每种因素取值的变化范围。范围既不能扩大，也不能缩小。范围扩大了，可能发生实际组装中实现不了所要求参数值的弊病(如精度达不到，出事故等)。范围缩小了，则有可能漏掉好的参数值。

有些项目，由计算公式定出的目标函数比较复杂。就是说，有不少的相对极值。这时，在开始阶段，只要因素的位级用量不超出变化范围，各种因素的位级之间的公比或公差可以取大一些。正是由于正交表条件的均衡分散性，即使是胡碰乱撞，也容易达到高水平的相对极值。不同的初始条件也可以多试几组。在试算过程中，观察不同相对极值的所在位置和达到的水平。试算多了，就容易达到(最优化的)绝对极值。

第二节 质量损失函数

为了评价一项产品的经济效果，我们来讨论损失函数。

2.1 成本相同的假定

组装某种电源电路，需要一些原材料(如焊接材料等)、元器件。譬如需要某种型号的三级品的电阻。这种同一型号的三级品电阻，质量仍有好有坏。按质论价，价值应该不同。但不能搞烦琐哲学，通常买进的价格是一样的。利用这些原材料、元器件，加工成电源电路，每部的加工费(管理费、工资、能源的损耗、机器与厂房的磨损折旧、参观招待费等)也不尽相同。因此，仔细追究起来，每部电源电路的成本是不全相同的。假若这个月组装了6000部电源电路，其材料费为233000元，加工费为7000元，则

$$\text{平均成本} = \frac{6000\text{部的材料费} + 6000\text{部的加工费}}{6000} = \frac{233000 + 7000}{6000} = 40 \text{元/部}.$$

每部电源电路的成本虽然不尽相同，但我们近似地假定它们的成本是相同的，是用了平均成本去作为每一部电源电路的成本。

$$\text{损失函数} = \text{质量损失函数} + \text{成本损失函数}.$$

既然成本被假定为相同，故总损失的大小取决于质量损失函数的高低。

2.2 质量损失函数及其近似表达式

某种彩色电视机的电源电路要求把交流220伏的输入变为直流100伏的输出。在成本相同的假定下，电源电路质量的好坏，除经久耐用之外，主要是要求直流输出能稳定在标准中心值100伏附近。越接近100伏，使用的质量越好，所造成的损失越小；越离开100伏，使用的质量越差，所造成的损失越大。

一般地，随着产品指标值 y (如上面的电源电路的直流输出电压)的变化，产品的质量所造成的损失 $q(y)$ 也随着变化。

在很多情况下,质量损失函数 $q(y)$ 的曲线如图 1 那样,是中间低、两头高的。它在某一点 $M[m, q(m)]$ 处最低 (例如,上面电源电路中的 $m = 100$),即由质量造成的损失最小。 y 越偏离 m , 由质量造成的损失越大。

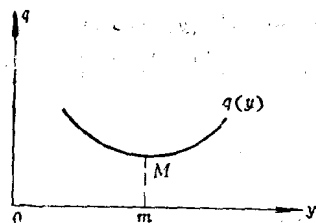


图 1

曲线 $q(y)$ 在 $y=m$ 的附近,曲线弧 AB 可以用割线 AB 代替,而割线的极限状态是曲线在点 M 处的切线 CD 。当 y_1, y_2 越接近 m 时,三种线 (曲线、割线、切线) 越相互靠近,用切线 (一次式) 来代替曲线的近似程度就越好;当 y_1, y_2 离 m 稍远时,这种用切线来代替曲线的近似程度就可能不好了。这时可以用通过三点 A, M, B 的二次曲线来近似代替。用二次曲线代替曲线 $q(y)$ 比用切线代替的范围可以扩大一些,即可以离开点 M 更远一些。当然,如果离开点 M 太远,就是用二次曲线来代替,有时候近似程度也是不好的。

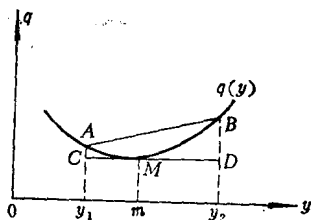


图 2

下面用数学推导把这个现象再说明一遍。假定 $q(y)$ 在 $y = m$ 处存在二阶导数,则按戴劳公式有

$$q(y) = q(m) + \frac{q'(m)}{1!} (y-m) + \frac{q''(m)}{2!} (y-m)^2 + o[(y-m)^2]. \quad (1)$$

由于 $q(y)$ 在 $y=m$ 处取极小值,所以有 $q'(m)=0$ 。故

$$q(y) \approx q(m) + k(y-m)^2, \quad (2)$$

其中 $k = [q''(m)/2!]$ 是不依赖于 y 的常数。即质量损失函数在 $y=m$ 附近近似地等于一条抛物线 (二次函数)。

令 $Q(y) = q(y) - q(m)$, 得

$$Q(y) \approx k(y-m)^2. \quad (3)$$

$Q(y)$ 和 $q(y)$ 仅相差一个常数 $q(m)$, 它不影响对于不同的 y 值损失大小的相对比较。也称 $Q(y)$ 为质量损失函数。今后,对于不同的 y 值,我们用 $Q(y)$ 的近似表达式 $k(y-m)^2$ 来比较损失的大小。

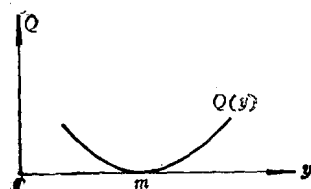


图 3

当生产一件产品,其指标为 y 时,其损失由 $Q(y) = k(y-m)^2$ 来计算。当产品不只一件时,我们记 $E[(y-m)^2] = V$, 称 V 为偏差均方。每件产品的平均损失由 $Q = kV$ 来计算。其中特别当 $E(y) = m$ 时,则 $\sqrt{V}$ 为标准差。我们以后在第四篇中会见到,为了提高产品的稳定性,通过参数的正交设计,可以使 V 大大减小,即精度高或稳定性好,从而使质量损失大大减少,其(经济)效果往往是很大的。

2.3 机能界限与出厂公差

在成本相同的情况下,电源电路质量的好坏,损失的大小是由其输出电压 y 与 100 伏的偏离程度来决定。我们选定 $y = 100$ 伏为标准中心,是因为此时造成的损失最小。

一般地,我们是根据“损失最小”这一原则来确定产品使用性能指标的标准中心或称为目标值 m 的。

所谓公差范围 $[m - \Delta, m + \Delta]$ 是指产品指标值 y 在该范围内时,产品为合格品;当

$y < m - \Delta$ 或 $y > m + \Delta$ 时, 产品为不合格品。那么容差 Δ (即公差 2Δ 的一半) 又该如何确定呢? 它也应该根据损失函数, 按照“损失最小”这一原则来确定。具体方法如下:

假若产品作为不合格品处理时 (报废、降级、返修), 工厂的损失如果是 A , 那么可求得点 y_0 , 满足 $Q(y_0) = A$, 从而以 $\Delta = |y_0 - m|$ 作为出厂容差是恰当的。这是因为, 对于一个指标为 y 的产品, 当 $|y - m| \leq \Delta$ 时, 产品作为合格品, 其损失为 $Q(y)$, 要比作为不合格品的损失 $A = Q(y_0)$ 为小; 而当 $|y - m| > \Delta$ 时, 产品作为不合格品, 其损失为 A , 要比作为合格品的损失 $Q(y)$ 为小。从图 4 可以看出: 以 Δ 作为容差, 损失总是处于较低的线 $////$ 上, 符合“损失最小”的原则。此时的损失函数仍以 $Q(y)$ 记之, 其表达式为

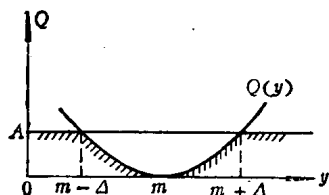


图 4

$$Q(y) = \begin{cases} k(y - m)^2, & \text{当 } m - \Delta \leq y \leq m + \Delta \text{ 时,} \\ A, & \text{当 } y < m - \Delta \text{ 或 } y > m + \Delta \text{ 时.} \end{cases}$$

通过下面的例子, 我们来说明机能界限与出厂公差是不同的。并说明如何通过机能界限来求损失函数与容差。

假如电视机的电源电路的直流输出电压的标准中心值 $m = 100$ 伏, 机能界限 $\Delta_0 = 15$ 伏。所谓机能界限, 在此就是指该电路的直流输出电压偏离标准中心值, 没有超过 15 伏时, 由该电路组装的电视机还可以用, 能起些正面的作用; 若达到 15 伏时, 由该电路组装的电视机就不能用, 正负作用正好抵消, 完全丧失了机能; 若超过 15 伏时, 则负作用大于正作用。这种界限叫做机能界限 (见图 5)。在机能界限处, 常能求得 $Q(y)$ 的值。对于理想产品, 比如当输出电压 $y = 100$ 伏 (标准中心值) 时, 包括合理利润在内的厂内核定价格设为 50 元。由于 $Q(100) = 0$, 稳压电源在机能界限 100 ± 15 伏处的价值为 0。由此引出, 在机能界限处的质量损失

$$D = Q(100 \pm 15) = 50 \text{ 元} = k(15)^2.$$

因而有

$$k = \frac{D}{\Delta_0^2} = \frac{50}{15^2} = 0.22 \text{ (元/伏}^2\text{)}.$$

从而得损失函数

$$Q(y) = 0.22(y - 100)^2. \quad (4)$$

现在假设工厂有一电视机, 输出电压是 102 伏, 偏离标准中心值达 2 伏, 远没有超过机能界限 15 伏, 还可以用。但是不是可以作为合格品出厂呢? 也就是说, 看容差是否大于 2 伏? 若容差大于或等于 2 伏, 则该产品为合格品; 若容差小于 2 伏, 则为不合格品。那么容差该怎么求呢?

假若工厂对这电视机加工返修, 更换电路中的某一电阻, 使之达到标准中心值, 这时的成本 $A = 0.4$ 元 (包括电阻的价钱、焊接改装费、合理利润等等)。

将损失函数式 (4) 的左边 $Q(y)$ 用 0.4 元代入, 则有

$$0.4 = 0.22(y - 100)^2,$$

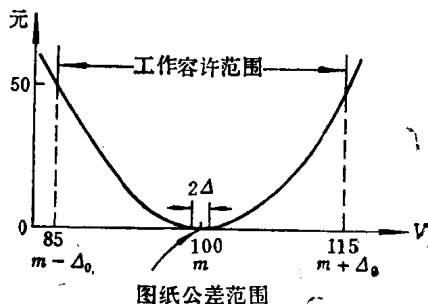


图 5

对 y 求解得

$$y = 100 \pm \sqrt{\frac{0.4}{0.22}} = 100 \pm 1.34(V).$$

因而图纸上的容差为1.34伏。输出电压是102伏的电视机，虽然可以用，但在工厂应当作为不合格品，必须经过返修加工，使达到标准中心值，再出厂为宜。这是为什么呢？

假若工厂对输出电压是102伏的电视机不返修加工(即不换电阻就出厂)，工厂少花0.4元的返修费，但却给用户带来比这多得多的损失：

$$Q(102) = 0.22 \times (102 - 100)^2 = 0.88 \text{元}.$$

社会总损失增加 $0.88 - 0.4 = 0.48$ 元。日本书称工厂的这种做法是“比小偷还要坏”。因为小偷偷得0.4元，被偷的人只损失0.4元，小偷所得与被偷人所失正好相等。社会总损失为 $0.4 - 0.4 = 0$ 。

一般地，若已知机能界限为 Δ_0 ，且 $Q(m \pm \Delta_0) = D$ ，又知工厂中出现不合格品时的损失为 A ，则该产品的损失函数 $Q(y)$ 与容差 Δ 分别为：

$$Q(y) = \frac{D}{\Delta_0^2} (y - m)^2, \quad \Delta = \sqrt{\frac{A}{D}} \cdot \Delta_0.$$

参 考 文 献

- [1] 北京大学数学系试验设计组，电视讲座《正交试验法》，科学普及出版社(1981)。
- [2] 田口玄一，实验计画法(上)，丸善株式会社(1976)。
- [3] 田口玄一，质量管理教材(线外QC)，中部品质管理协会(1979)。
- [4] GENICHI TAGUCHI, YUIN WU, INTRODUCTION TO OFF-LINE QUALITY CONTROL, Central Japan Quality Control Association (1979)。
- [5] 张惠康，庄镇泉，电子线路的计算机辅助设计，人民教育出版社(上册1979，下册1980)。

第二篇 产品参数的直接择优

判别产品性能好坏的指标，有些是定量的，有些是非定量的；有些是一项指标，有些是多项指标。对于非定量的指标，我们可以用评分的办法把它量化；对于多项指标的，可以根据各项指标的主次关系采用加权评分的办法，综合成单一的数量指标〔细节可参看：例如本篇的（一）、（二）、（三）、（四）、（六）〕。对于单一的数量指标，有些是越小越好，有些是越大越好，有些是与某一个数值越接近越好，若能够根据这种单一数量指标，直接选择、设计或评出质量好的条件（好的参数组合），我们就称之为直接择优。

在这一篇里，首先通过电子学教科书中一个典型的线路——并联反馈偏置电路，来介绍可计算指标的产品的参数设计。这个例子是多指标的。其中研究电流、电压对温度在一段区间上变化的稳定性（这里的稳定性与第四篇的稳定性的含义不完全一样）。经过三轮正交选优，找到了满足多项指标要求的很好的参数组合（条件），圆满地解决了过去在教科书中只作定性描述，不能作定量刻划的问题。第二个例子是关于汽车行驶平顺性的设计，通过一轮 $L_9(3^4)$ 的计算，便找出了振动参数的优良匹配。第三个例子是兵器设计中的一个项目，作者在多种方法对比的基础上，肯定了正交法既简单又有效。第四个例子是夜视光学仪器设计中的一个实际项目。在国外封锁、国内缺乏资料的情况下，用正交法找到了好的设计参数，并作了误差分析，完全满足设计的要求。第五、六、七三个例子都是七六一厂的。第五个例子是关于高频负反馈对电路的设计，已经投产，仅其中一个管子，年节约至少三万元。第六个例子是关于滤波器的设计，要求较多，难度较大，其中加权评分的公式有特点。第七个例子是关于标准化直流稳压电源的设计，经过初步计算，较原来有许多方面的提高。第八个例子是光学系统设计的项目。

（一）并联反馈偏置电路的参数设计

余道衡 史美琪 郑玉颖 张良骅

（北京大学无线电电子学系）（中国科学院系统所）（重庆师范学院数学系）

在电子线路中，温度对于晶体管的电流放大倍数 β 、基极-发射极电压 V_{be} ，集电极-发射极间穿透电流 I_{ceo} 等参数的影响很大。通常在分析电路时，必须考虑环境温度对静态工作点的严重影响。在设计时，要保证在整个工作范围内，电路性能稳定不变。其中晶体管静态工作点的稳定就是最基本的问题之一。这就是晶体管稳定偏置电路的参数设计问题。

通常采用的晶体管单管稳定偏置电路，如图1，图2所示。其中图1的电路参数 R_c ， R_b ， R_e ， β ， V_{be} ， I_{ceo} 及电源电压 E_c 与晶体管工作电流 I_c ，管压降 V_{ce} 的关系，在 $I_b \approx 0$ 的条件下，可以近似地得出简单的关系式。因此在传统的参数设计中，根据给定的 E_c ， I_c 和