

信華 經管 创优系列·管理科学与工程



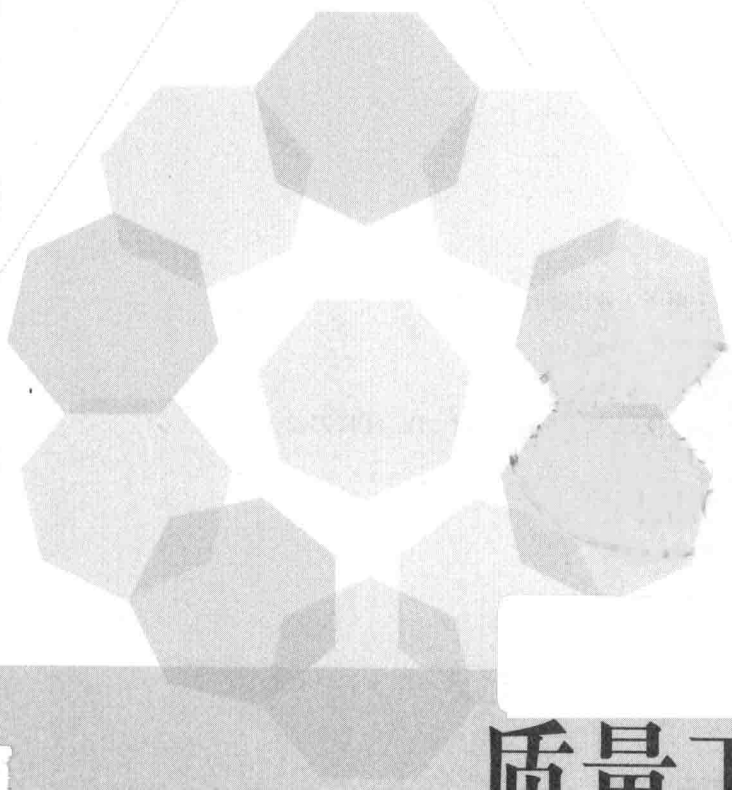
质量工程试验设计

Quality Engineering Design of Experiment

王海燕 孟秀丽 主 编



创优系列·管理科学与工程



质量工程试验设计

Quality Engineering Design of Experiment

王海燕 孟秀丽 主编

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

《质量工程试验设计》从试验设计概述、回归分析、方差设计、正交试验设计、稳健设计、因子设计、均匀设计和响应曲面设计等方面系统讨论了试验设计的基本理论与方法。本书既注重试验设计基本理论的系统性,又突出应用,列举了大量与工业、化学、食品、制药、生物、材料和环境等专业有关的案例,介绍了 Minitab 软件在试验设计中的应用,将各种试验设计方法结合案例在 Minitab 下实现。本书配套电子课件和习题解答等教学辅助资源,读者可登录华信教育资源网(<http://www.hxedu.com.cn>)免费注册下载。

本书既可作为高等院校相关专业本科生和研究生的教材,也可供相关学科的科研、教学和设计人员阅读。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

质量工程试验设计/王海燕,孟秀丽主编. —北京:电子工业出版社,2015.1

(华信经管创优系列)

ISBN 978-7-121-24694-4

I. ①质… II. ①王…②孟… III. ①质量管理—试验设计—高等学校—教材 IV. ①F273.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 256627 号

策划编辑:王志宇

责任编辑:王志宇 文字编辑:徐 颢

印 刷:三河市鑫金马印装有限公司

装 订:三河市鑫金马印装有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编:100036

开 本:787×1 092 1/16 印张:14.25 字数:365 千字

版 次:2015 年 1 月第 1 版

印 次:2015 年 1 月第 1 次印刷

印 数:3 000 册 定价:39.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

总 序

质量问题是经济社会发展的一个战略问题。党和国家历来高度重视质量工作，新中国成立以来，尤其是改革开放以来，党中央、国务院制定实施了一系列政策措施，初步形成了中国特色的质量发展之路，但是产品、工程、服务等质量问题造成的经济损失、环境污染、资源浪费等现象仍比较严重；质量安全形势仍然严峻，产品质量安全，特别是食品安全事故时有发生；一些生产经营者质量诚信缺失，肆意制售假冒伪劣产品，危害人民群众生命健康安全，损害国家信誉和形象；与发达国家相比，“中国制造”质量竞争力还不够强，缺少具有国际影响力的知名品牌和产品，质量问题已成为我国经济社会健康发展的一个制约因素。

21 世纪的第二个十年，是我国全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化的关键时期，是深化改革开放、加快转变经济发展方式的攻坚时期，也是质量发展的又一个重要时期。从国际上看，经济全球化深入发展，科技进步日新月异，全球产业分工和市场需求结构出现明显变化，以质量为核心要素的标准、人才、技术、市场、资源等竞争日趋激烈。从国内看，我国工业化、信息化、城镇化、市场化、国际化进程加快，要贯彻落实科学发展观，实现又好又快发展，需要坚实的质量基础；要加快转变经济发展方式，特别是实现制造业由大变强，需要可靠的质量支撑；要满足人民群众日益增长的质量需求，也需要更强的质量保障能力。然而长期以来，由于质量管理工程专业一直没有列入教育部学科目录，从本科生教育到研究生教育，针对专业质量人才的培养规模极为有限。

2012 年，教育部批准在高等学校本科专业中增设质量管理工程专业，南京财经大学是国内首个设置质量管理工程专业的高校，并且江苏省教育厅为了充分发挥区域高等教育资源集聚优势，高校之间实现优势互补、强强联合，加快推进高等教育内涵式发展，扎实推进高等教育综合改革试验区建设，将此专业作为南京财经大学、南京大学、南京师范大学、南京邮电大学和南京中医药大学五校共建的专业。基于质量管理工程专业教育缺乏系统教材的现状，我带领南京财经大学质量管理工程专业的骨干教师们编写了这套质量工程系列教材，主要包括《质量统计学》《质量可靠性理论与技术》《质量分析与质量控制》《服务质量管理》《质量工程试验设计》五本，希望这套教材能缓解质量管理工程专业高等教育教材短缺的压力，为我国质量管理工程专业的发展尽一份绵薄之力。由于质量管理工程的专业建设在我国还处于探索期，加上我们的学术水平和知识有限，教材当中难免存在各种不足，恳请国内外同仁多加批评指正。

另外，本套教材受以下项目资助——国家重大科学仪器设备开发专项：微分迁移谱-质谱快速检测仪的开发与应用（项目编号 2013YQ090703），国家自然科学基金：我国食品安全管理中的质量链协同控制理论与方法研究（项目编号 71373117）。在此对科技部和国家自然科学基金委表示感谢！

南京财经大学管理科学与工程学院院长
江苏省质量安全工程研究院执行院长
王海燕教授
于南京

前 言

质量管理作为提高企业素质、取得经济效益的现代化管理科学技术，正在国内外大力推行，试验设计也正在工业各行业中广泛应用，成为质量管理、优化管理决策和优化设计的重要技术手段。试验设计是统计学中一个最基本的分支，是一门研究如何正确地安排试验和分析数据并以较少的试验得到最佳的试验结果的科学。试验设计的理论和方法由最初的农业、生物及医学试验逐渐发展到工业管理领域，特别是在产品设计、质量管理及经济学等领域中的广泛应用越来越受到人们的重视。但是，目前既能适合本科学生的教学要求，又能为工程技术等领域的科技人员提供较好参考的教材还不多。近年来，编者及所领导的项目组成员多次为工业工程、管理科学、质量工程等专业的本科学生和研究生讲授试验设计的相关课程，同时在一些应用领域给各行业质量管理人员培训过这方面的知识。在此基础上，基于理论和实践相结合的原则，编写了这本书。全书分为7章，具体安排如下。

第一章介绍了试验设计的起源与发展，以及试验设计的目的和意义，并研究了试验设计的基本策略与实施步骤。第二章是理论基础，介绍了统计上的方差分析与回归分析，属于试验数据处理的范畴，是试验设计的预备知识。第三章主要介绍了正交试验设计方法，并对正交试验设计结果的极差分析和方差分析进行详细介绍。第四章介绍了稳健设计的主要内容，包括质量损失、信噪比及其应用、三次设计和案例分析等。第五章主要介绍了因子设计，包括 2^k 因子设计、 3^k 因子设计和案例分析。第六章主要介绍了其他试验设计的方法，包括均匀设计和响应曲面设计。第七章介绍了 Minitab 在试验设计中的应用，将本书介绍的几种方法结合案例在 Minitab 下实现。本书配套电子课件和习题解答等教学辅助资源，读者可登录华信教育资源网(<http://www.hxedu.com.cn>)免费注册下载。

本书在保持本学科的系统性和科学性的前提下，注意引入本学科发展的新知识、新成果；在正确阐述统计学原理的同时，着重于基本概念和基本方法的介绍；注重学生动手能力的培养，拓宽学生的知识面和提高统计分析与计算机应用能力的结合；对每种试验设计方法都安排了步骤完整、过程详细的案例，并注重案例的启发性；同时各章都配备习题供读者练习。本书注重实际应用的方法，列举了大量与工业、化学、食品、制药、生物、材料、环境等专业有关的案例，可作为相关专业本科生和研究生的教材，也可供相关学科的科研、教学和设计人员阅读参考。

本书由南京财经大学管理科学与工程学院组织编写，由王海燕、孟秀丽主编，参与编写的人员还有刘军、唐润、张庆民、张斯琪、仲琴等老师，西安理工大学曹龙老师、石河子大学赵永满老师对本书编写也给予了帮助与支持，感谢沈鑫、俞磊、王虎、尹小华、钱昆、马晖玮、陆晶晶等研究生在教材编写过程中付出的辛苦劳动。在编写过程中参考了国内外的大量文献、教材和专著，由于篇幅原因未能将所有的参考资料都列出，编者在此对这些资料的作者表示衷心的感谢，对大力支持此次编写工作的电子工业出版社和南京财经大学也一并表示感谢！

由于编者水平有限，书中难免有不妥之处，诚请广大读者批评指正。咨询、意见和建议可反馈至本书责任编辑邮箱：wangzy@phei.com.cn。

编 者

目 录

第一章 概论	1
章前导引	2
第一节 起源与发展	2
第二节 试验设计的目的与用途	4
一、试验设计的目的	4
二、推广试验设计的重要意义	5
第三节 策略与路径	5
一、试验设计的基本原则	5
二、试验策略的确定	6
三、试验设计的步骤	7
章后小结	9
习题	9
第二章 基础理论	10
章前导引	11
第一节 方差分析	11
一、方差分析简介	11
二、单因素方差分析	12
三、双因素方差分析	16
第二节 回归分析	23
一、回归分析简介	23
二、简单线性回归分析	24
三、多元线性回归分析	29
四、非线性回归	35
章后小结	37
习题	37
第三章 正交试验设计	40
章前导引	41
第一节 正交试验设计的基本思想	41
一、正交试验概述	41
二、正交拉丁方	41



第二节 正交表	43
一、正交表——正交拉丁方的自然推广	43
二、正交表的分类与性质	44
第三节 正交试验设计的基本步骤	47
一、正交试验方案设计	47
二、根据正交试验方案进行试验	49
三、试验结果的计算与分析	49
四、验证试验	50
第四节 正交试验设计结果的极差分析	50
一、单指标正交试验设计的极差分析	50
二、多指标正交试验设计的极差分析	54
三、有交互作用正交试验设计及其结果的极差分析	58
五、混合水平的正交试验设计及其结果的极差分析	62
第五节 正交试验设计结果的方差分析	63
一、正交试验结果方差分析基本步骤	64
二、二水平正交试验结果的方差分析	66
三、三水平正交试验结果的方差分析	68
四、考虑交互作用正交试验结果的方差分析	70
五、混合型正交试验结果的方差分析	72
第六节 案例分析	74
一、二水平正交试验	74
二、三水平正交试验	78
章后小结	83
习题	84
第四章 稳健设计	85
章前导引	86
第一节 稳健设计概述	86
第二节 质量损失	87
一、质量损失概述	87
二、质量损失函数	89
三、平均质量损失	92
四、利用非线性特性减少质量损失	93
第三节 信噪比及其应用	94
一、信噪比的基本概念	94
二、SN 的定义式	95
第四节 三次设计	96
一、三次设计简介	96





二、系统设计	97
三、参数设计	99
四、容差设计	104
第五节 稳健性设计的基本步骤	108
第六节 案例分析	114
章后小结	118
习题	118
第五章 因子设计	120
章前导引	121
第一节 因子设计的一般概念	121
第二节 2^k 因子设计	122
一、 2^2 设计	122
二、 2^3 设计	126
三、一般的 2^k 设计	131
四、 2^k 设计的耶茨算法	136
第三节 3^k 因子设计	138
一、 3^2 设计	138
二、 3^3 设计	141
三、一般的 3^k 设计	141
第四节 案例分析	142
章后小结	148
习题	148
第六章 其他试验方法	150
章前导引	151
第一节 均匀试验设计	151
一、均匀试验设计的概念与特点	151
二、均匀设计的思想	153
三、均匀设计表	153
四、均匀性准则	157
五、均匀设计的基本方法	160
六、均匀试验设计应特别注意的几个问题	164
七、应用案例:阿魏酸合成工艺的优化设计	164
第二节 响应曲面方法	166
一、响应曲面分析方法的基本概念	166
二、一阶响应曲面设计方法	167
三、二次响应曲面的设计与分析	175



四、基于多元正交多项式的响应曲面设计	179
五、二次响应曲面分析	180
章后小结	185
习题	186
第七章 试验设计方法的 Minitab 软件操作	187
章前导引	188
案例一 某化工厂正交试验改善案例	188
案例二 膨胀剂生产工艺参数的优化设计	193
案例三 全因子试验设计案例	197
案例四 某化工品的合成工艺	200
案例五 Box-behnken 试验设计及案例	201
章后小结	205
附录一 常用正交表	206
附录二 常用均匀设计表	215
参考文献	217



第一章 概 论



- 第一节 起源与发展
- 第二节 试验设计的目的与用途
- 第三节 策略与路径



章前导引

试验设计(Design of Experiments, DOE)是研究如何制定适当试验方案以便对试验数据进行有效的统计分析的数学理论与方法,由英国统计学家、工程师费歇尔(R. A. Fisher, 1890-1962)于20世纪20年代创立。试验设计研究如何合理地安排试验、取得数据,然后进行综合的科学分析,从而达到尽快获得最优方案的目的。

试验设计法已有70余年的历史,在美国和日本,被广泛应用于农业、制药、化工、机械、冶金、电子、汽车、航空航天等几乎所有工业领域,来提高产品质量。我国从20世纪50年代开始,也开展对试验设计这门学科的研究,并逐步应用到工农业生产中去。在应用的过程中,我国在试验设计观点、理论和方法上都有新的创见,并将创见成果大力推广。

试验设计是提高产品开发设计质量的有力工具,“美国汽车工业标准 QS 9000 质量体系”的要求中已将试验设计列为必须应用的技术之一。著名的参数设计也是在正交试验设计的基础上发展起来的。另外,开展试验设计不但可以找到优化的参数组合,在很多情况下也可以通过设置误差列,进行方差分析,定性地判断环境因素和加工误差等各种误差因素对期望的产品特性的影响,并采取改进措施,消除这些误差的影响。因此对于一些简单的工程问题,直接应用试验设计法也能获得令人满意的健壮的设计方案。试验设计还可应用于改进企业管理,调整产品结构,制订生产效益更高的生产计划等。

第一节 起源与发展

试验设计的基本思想和方法是英国统计学家、工程师费歇尔于20世纪20年代创立的。

20世纪20年代初,费歇尔在英国伦敦郊区农场的洛萨姆斯·斯台特农业试验站任职期间,将试验设计法应用于田间试验中,对高产小麦品种遗传进行试验研究。他指出,在环境条件难以严格控制、试验数据受到偶然性因素的影响下,必须承认误差的存在。试验设计的基本思想是减少偶然性因素的影响,使试验数据有一个合适的数学模型,他一改传统的逐一因素依次试验的方法,对不同因素的每一水平组合进行试验。最后,用方差分析对数据进行统计分析来评价指标的优劣。

1923年,费歇尔同W. A. 梅克齐合作,共同发表了“试验设计应用实例”论文。1925年,费歇尔在《研究工作中的统计方法》一书中称这种方法为试验设计。后来,费歇尔全力从事试验设计的研究工作。他在总结自己的试验设计思想和方法的基础上,于1935年出版了名著《试验设计法》,从此开创了一门新的应用数学学科领域。因此,费歇尔被誉为试验设计的奠基者和创始人。

20世纪40年代前后,英国、美国、苏联等国将试验设计法逐渐应用到工业生产领域





中,在采矿、冶金、建筑、纺织、化工、机械、医药等行业都有所应用。第二次世界大战期间,美英等国在国防工业试验中采用试验设计法取得成效。第二次世界大战末期英国皇家军需工厂管理局出版了一份备忘录,公布了一批应用实例。D. J. 劳尼在 20 世纪 40 年代提出的多因素试验的部分实施方法,奠定了现代试验设计理论与方法的基础。

40 年代末 50 年代初,日本电讯研究所(EOL)以田口玄一博士(Dr. Genichi Taguchi)为首的一批研究人员在研究电话通信设备系统质量时发现,自费歇尔以来创造的试验设计方法,不论是全因素试验法,还是随机区组法、拉丁方格法等,在工业生产中的应用均受到限制。于是,他们在实践中努力研究和改进英国人创立的试验设计技术,开发了用正交表安排试验、分析试验结果的正交试验优化技术方法。1952 年,田口玄一在日本东海电报公司运用 $L_{27}(3^{13})$ 正交表进行项目的试验设计获得成功。之后,正交试验设计法在日本,继而在国际上得到迅速的推广。

与此同时,50 年代初,在综合回归分析与试验设计最新研究成果的基础上,田口玄一创立了回归试验设计技术,这也是应用数学的一个新发展。它将试验的方案设计、数据处理与回归方程统一起来进行优化,已成为现代通用的一种试验设计优化技术。回归试验设计主要从正交性、旋转性等优良性出发,利用正交表、正交多项式回归、中心组合设计、单纯性,以及计算机编制试验方案等,直接建立各种线性和非线性回归方程。由于它具有设计表格化、公式规范化、分析程式化等特点,为这项技术的实际应用提供了方便条件。

1957 年,田口玄一提出了信噪比(SN 比)试验设计法,以解决产品设计中的动态特性和稳定性问题,为试验设计拓宽了新的内容,为工业产品的三次设计即正交优化设计开辟了新的途径。

G. E. 博克斯和 J. B. 亨特尔于 1959 年提出的调优操作(EVOP),是借助主动试验对系统寻优的方法,因此,也可称为一种试验方法——调优试验设计。从控制论观点来看,它是一种有工艺反馈的控制,具有自动寻求最优生产条件的特点,适合在生产工艺改进过程中筹划、安排试验,寻找每个发展阶段中的最优条件,以实现生产作业过程的动态优化。这种方法自 60 年代以来,在国内外一些行业里得到较广的应用。

70 年代中期,田口玄一博士提出了工业产品开发设计中运用三次(段)设计的思想和方法,这是对传统的试验设计技术方法的完善和重要发展,为企业研究产品质量与成本的最佳配合及其试验设计技术提供了系统方法。该方法灵活运用 SN 比设计法,充分利用产品或系统中存在的非线性效应,利用专业技术、生产实践提供的信息资料,同正交试验设计技术相结合,取得高质量、低费用的十分显著的技术经济效果。从试验设计技术发展的历程来看,如果说费歇尔创立的早期的、传统的试验设计是第一个里程碑,正交表的开发和正交试验设计法的广泛应用是第二个里程碑,那么,田口玄一的 SN 比试验设计的开发和三次设计的创立则是第三个里程碑。

在上述的基础上,田口玄一从 80 年代开始,提出走质量工程学道路,编著《质量工程学》丛书,将质量管理、质量控制及试验设计科学的发展,提高到一个新的水平。



我国从 20 世纪 50 年代开始,开展对试验设计这门学科的研究,并逐步应用到工农业生产中去。60 年代末,在正交试验设计的观点、理论和方法上都有新的创见,编制了一套较为适用的正交表,简化试验程序和试验结果的分析方法,自 70 年代以来,大力推广。同时,在正交试验设计理论上也有新的突破。

从 80 年代开始,我国学者方开泰教授等又创立了均匀试验设计法,在工业生产中取得了初步效果。SN 比试验设计和三次设计以及各种回归试验设计技术的理论、方法和实际应用,都有了长足的进步。

综上所述,试验设计技术的历史发展大致分三个阶段,即费歇尔创立的早期、传统的试验设计法阶段(约 20 世纪 20~50 年代),正交表的开发、正交试验设计和回归试验设计广泛应用阶段(约 20 世纪 50~70 年代)以及 SN 比试验设计技术的开发、三次设计的创立、均匀试验设计的开发、回归试验设计深入发展的现代试验设计阶段(约 20 世纪 70 年代至今)。

第二节 试验设计的目的与用途



一、试验设计的目的

必须指出,试验设计是否科学,是否经济合理,能否取得良好的效果,并非轻而易举就能得到的,只有试验参加者具备有关试验设计领域里的理论基础和知识及方法技巧,才能胜任这项工作。此外,搞好试验设计工作还必须具有较深、较广的专业技术理论知识和丰富的生产实践经验。因此,只有把试验设计的理论、专业技术知识和实际经验三者紧密结合起来,才能取得良好的效果。

试验设计的目的是为了获得试验条件与试验结果之间规律性的认识。对于一个良好的试验设计来说,都要经过三个阶段,即方案设计、试验实施和结果分析。在方案设计阶段,要明确试验的目的,即明确试验要达到什么目标,考核的指标和要求是什么,选择影响指标的主要因素有哪些以及因素变动的范围(水平多少)怎样,制定出合理的试验方案(或称试验计划);试验实施阶段是根据试验方案进行试验,获得可靠的试验数据;结果分析阶段是采用多种方法对试验测得的数据进行科学的分析,找出考察的因素哪些是主要的、哪些是次要的,并选取优化的生产条件或因素水平组合。

最后,还需指出,试验设计能从影响试验结果的特性值(指标)的多种因素中,判断出哪些因素显著,哪些因素不显著,并对优化的生产条件所能达到的指标值及其波动范围给予定量的估计。同时,也能确定最佳因素水平组合或生产条件的预测数学模型(所谓经验公式)。因此试验设计适合解决多因素、多指标的试验优化设计问题。特别是当一些指标之间相互矛盾时,运用试验设计技术可以明确因素与指标间的规律性,找出兼顾各指标的适宜的生产条件或优化方案。





二 推广试验设计的重要意义

(一) 试验设计是提高产品开发设计质量的有力工具

工业企业的基本任务是向市场、用户或消费者提供满足需要的产品,并获得经济效益。从全面质量管理观点来看,产品质量的保证与控制应贯穿于产品开发设计、生产制造、销售服务的全过程。其中,尤以提高产品的设计质量最为重要。若设计质量水平不高,生产制造中再怎么控制也很难制造出高质量的产品,即所谓“先天不足,后患无穷”。全面质量管理科学创始人之一,美国质量管理专家朱兰(J. M. Juran)博士认为,设计质量占整个产品质量的比率为60%左右。现代试验设计技术奠基者,日本质量管理权威田口玄一博士认为,设计质量(包括产品设计和工艺设计)占整个产品质量的比率为70%左右。由此可见,搞好产品的试验设计工作是搞好产品开发设计关键的第一步,有着十分重要的意义。

(二) 试验设计是加速国民经济发展的有效方法

市场经济发展的历史证明,企业不断地开发设计与制造出受用户或消费者欢迎、质优价廉的产品,就能在激烈的市场竞争中兴旺发达、立于不败之地。经济发达国家,例如美国、日本、德国,他们的产品在国际上享有很高的声望,是与十分重视产品开发设计工作、注重试验设计技术的研究与推广分不开的。日本在第二次世界大战后工业生产飞跃发展的原因之一,就是在工业领域里普遍推广应用试验设计技术方法。已故的日本质量管理专家石川馨教授曾在日本的《质量管理》杂志上撰文写道:“日本是世界上应用正交表很广泛的国家之一。这是以田口玄一先生为首的很多人努力的结果,正交表这个试验设计法对日本生产的发展做出了大的贡献,这是众所周知的事实。”日本的产品能打进美国市场、畅销世界各国的秘诀之一,就是运用试验设计这种被誉为日本“国宝”的技术。在日本,试验设计技术已成为企业界人士、工程技术人员、研究人员和管理人员必备的技术,以及工程师们共同语言的一部分。试验设计技术的应用与推广给日本企业带来了极大的经济效益。

我国研究推广试验设计优化技术的实践也证明了这一点。随着改革开放的深入,建设有中国特色的社会主义市场经济的实践,到21世纪中叶,我国在经济上达到中等发达国家水平的任务十分艰巨。其中一个重要方面就是要加强我国的产品开发设计工作,运用现代试验设计优化技术,以较短的周期、较低的费用,设计生产出质量高、成本低即经济效益好的产品,参与国际市场竞争。这无疑对于提高企业的经济效益和社会效益,加速我国经济发展,提高我国的综合国力,有着十分重要的意义。

第三节 策略与路径



一 试验设计的基本原则

试验设计的三个基本原则是重复、随机化和区组化。



所谓重复,意思是基本试验的重复进行。重复有两条重要的性质。第一,允许试验者得到试验误差的一个估计量。这个误差的估计量成为确定数据的观察差是否是统计上的试验差的基本度量单位。第二,如果把样本均值用作试验中一个因素的效应的估计量,则重复原则使得试验者能够求得这一效应的更为精确的估计量。如 s^2 是数据的方差,有 n 次重复,则样本均值的方差是 s^2/n 。这一点的实际含义是,如果 $n=1$,如果 2 个处理的 $y_1=145$, $y_2=147$,这时我们可能不能作出 2 个处理之间有没有差异的推断,也就是说,观察差 $147-145=2$ 可能是试验误差的结果。但如果 n 足够大,试验误差足够小,则当我们观察到 $y_1 < y_2$ 时,我们就有相当可靠的结论得出: $y_1 < y_2$ 。

随机化是试验设计使用统计方法的基石。所谓随机化,是指试验材料的分配和各个试验进行的次序,都是随机确定的。统计方法要求观察值(或误差)是独立分布的随机变量。随机化通常能使这一假定有效。把试验进行适当的随机化也有助于“均匀”可能出现的外来因素的效应。

区组化是用来提高试验精确度的一种方法。一个区组就是试验材料的一个部分,相比于试验材料全体,它们本身的性质应该更为类似。区组化牵涉到在每个区组内部对感兴趣的试验条件进行比较。



二、试验策略的确定

进行试验设计时,首先要确定的就是试验策略,现代管理之父——“大师中的大师”彼得·德鲁克曾说过“对的问题比对的答案更重要”。在进行试验设计的时候,首先要清楚我们的问题是什么类型,需要达到的目的或需要实现的成果是什么,使用的试验设计方法是否符合目标的要求。在确定这些后,才能决定是否进行试验设计解决问题。通常来说,我们把引起问题的原因和相关影响因素水平均不明确的问题称为 X 型问题;把引起问题的原因明确,但相关因素水平不明确的问题称为 A 型问题;将引起问题的原因和相关因素水平都明确的问题称为 T 型问题。在应用试验设计时,如果问题是 T 型问题,那么应用试验设计将浪费时间和资源。而遇到的是 X 型问题时,则应尽量将其转化成 A 型问题,应用试验设计加以解决。在确定了问题的类型之后,依据严格的试验策略才能取得应有的效果。

策略一是筛选主要影响因子,也就是将 X 型问题转化成 A 型问题,确定造成问题的原因。对于任何产品来说,影响产品质量的因素都非常多,无论产品零部件的材质、设计公差水平、装配工艺、环境条件等,都会对产品质量起到作用,这些影响因素对于产品质量高的影响程度必然不尽相同,试验策略的第一步就是分析确定每个影响因子对产品质量响应值的贡献度。在筛选因子时,影响因子数量宜多不宜少,避免遗漏掉可能的影响因素。影响因子数目增多,必然会带来试验规模的扩大和试验成本的增加,因此,在筛选影响因子的过程中,可以首先选取两水准因子(因子水平选择可控范围内的极限值),这样容易在结果中清晰地显示出主要效应的影响。使用 $2N$ 型直交表进行影响因子排列是筛选主要影响因子的较为理想的策略。这时最常用的试验配置为 $L_8 2^7$ 型或 $L_{16} 2^{15}$ 型。判定策略一实现的标志分为两方面,其一是在 ANOVA 方差分析中出现了 1~4 个显著因子;其二是这 1~4 个显著因子的影响效应累积贡献率 $\geq 70\%$ 。





策略二是找出最佳生产条件。在策略一筛选主要影响因子实现的基础上,通过策略二找出显著影响因子对结果响应值的影响的生产成本和质量等级的相互关系。通过少因子多水准的试验设计找出最佳生产条件。此时常用的试验配置为 L_93^4 型或 $L_{27}3^{13}$ 型。判断策略二实现的标志是在此时进行的试验中,通过ANOVA方差分析没有出现显著影响的因子。这也就意味着试验数据中的主要的误差都是由随机因素引起的。同时由于显著影响因子都没有表现出显著影响,因此,每一因子的各项水准均可使用,这也就意味着实现了成本低廉、质量优秀、控制容易的目的。

策略三是证实最佳生产条件有再现性。在工程技术设计和科学研究过程中,通过试验确定的设计参数和设计策略必须经过验证之后,才能确定使用。在策略三的阶段就是通过随机配置最终的方案进行试验验证,确定试验结果的真实可信和方案的可操作性。

很多技术人员在经历过试验设计培训之后,普遍在一定时期内对试验设计充满信心,但在实际工作中,一直能够真正有效地运用试验设计的技术人员却很少,大部分技术人员随着时间推移慢慢地会回到原有依靠经验解决问题的老路上,造成这种知易行难局面的原因就在于试验策略制定得不完善,引起试验结果不可分析或不合理,归根结底是对试验设计的策略没有充分理解和消化。明确问题的定义和范围,确定合适的解决问题工具,选择合适的影响因子,设计合理的试验规划,进行完整的试验测试,通过分析结果确定试验结果,通过试验验证得出结论。在试验过程中要始终贯彻这样的思路才能真正地应用好试验设计策略。



三、试验设计的步骤

试验设计的步骤是试验设计的骨架。它在进行试验设计的时候为技术人员搭建解决问题的框架,引领技术人员寻找解决问题的真正原因,同时还为技术人员今后进行试验设计提供方法上的指导。面对任何一个需要解决的问题,技术人员都应切实有效地遵循和了解试验设计的每个步骤,一步步稳健地达成预期的目标。在试验设计的过程中不可避免地会出现不符合预期的情况,这时,合理的试验设计步骤有助于发现和确定没有预期的影响因子,挖掘出影响产品性能和质量的真实原因,彻底解决问题。

设计和分析一个试验时要使用统计方法的话,和试验有关的每个人必须预先对所研究的问题究竟是什么,如何收集数据,要有清晰的认识,至少对如何分析这些数据要有定性的了解。推荐的步骤概要如下。

1. 问题的识别和问题的提法

这一点看起来似乎是最明白的,但在实践中,确认存在需要试验的问题却不那么简单,将问题摆明并变为都可接受的提法也不是那么简单。需要弄清有关试验目的的全部想法。通常,重要的是吸引所有有关人员的参与(包括操作人员)。清晰的问题提法对更好地理解现象和最终求得问题的解答有重大帮助。

2. 因素和水平的选择

试验者必须选择在试验中准备用来处理的因素,以及在做试验时对这些因素规定的水平;还必须考虑如何将这些因素控制在所希望的数值上以及如何测量这些数值。在这个过



程中,调查研究所有可能重要的因素,而不受过去经验的过分影响;特别是在试验的早期阶段或工序尚未很成熟时。当目的是因素筛选或过程特征化时,通常最好是保持低的因素水平数(最经常的是用两个水平)。

3. 响应变量的选择

在选择响应变量时,试验者应该确信该变量真正会对所研究的过程提供有用的信息。最常用的是取测量特性的平均值或标准差(或两者)为响应变量,多重响应不常用。仪表性能(或测量误差)也是一个重要因素。如果仪表性能差,则只有相对大的因素效应才能通过试验检测出来,或者需要做附加的重复试验。

4. 试验设计的选择

如果前3个步骤正确做到了,这一步相对容易。选择设计涉及考虑样本量(重复次数),对试验选择合适的试验次序,确定是否划分区组或者是否涉及其他随机化约束。

在选择设计时,重要的是,思想上总要想着试验目的。在很多工程试验中,我们一开始就知道,有些因素水平会使响应得出不同的数值。因此,我们感兴趣于识别哪些因素引起这种差异并估计响应改变量的大小。在某些情况下,我们会对验证一致性更感兴趣。例如,比较两种生产条件A和B,A是标准的,B是成本较低的,则试验者感兴趣于弄清两种生产条件的产率是否有差异。

5. 进行试验

当进行试验时,谨慎监视试验的过程以确保每件事情都按计划做完是非常重要的,这个阶段中试验方法的错误通常会破坏试验的有效性。计划在先是成功的关键。

6. 数据分析

分析数据应该用统计方法,使得结果和结论都是客观的,而不是主观臆断。如果试验设计正确,并且按设计实行,则所需的统计方法,可以有很多软件来分析数据,在数据的解释中,简单的图解法起了重要的作用。残差分析和模型适合性检测也是重要的分析方法。

统计方法不能证明一个因素(或几个因素)有特殊的效应。它们仅对试验结果的可靠性和有效性提供准则。从本质上来说,应用统计方法不允许利用试验来证明任何事情,但是,统计方法允许我们去度量结论中可能出现的误差或者对一个命题附加上置信水平。统计方法的基本优点是它对做出判决的过程加进了客观性。统计方法和良好的专业知识,以及常识结合在一起通常会导致正确的结论。

7. 结论和建议

一旦数据分析过了,试验者必须写出有关试验结果的实践结论并推荐行动的路线。在这一阶段,图解法常常是有用的,特别是给其他人介绍成果时更是如此。但有时还需进行跟踪试验和确认试验,以证实所得结论的正确性。

科学试验是一个不断总结经验的过程。在过程中,我们先提出了关于系统的假设,进而通过试验来研究这些假设,根据试验的结果又提出新的假设,如此等等。这表明,试验是迭代式地逐步深化的。因此,要避免在研究一开始,就去设计一个单一的、庞大的、内容广泛的试验。

